



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HANNA YLINEN
SÄHKÖHYDRAULISEN VENTTIILIOHJAUKSEN ANALYSOINTI JA
PARANTAMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Kalevi Huhtala
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden
tiedekuntaneuvoston kokouksessa 9.
marraskuuta 2016

TIIVISTELMÄ

HANNA YLINEN: Sähköhydraulisen venttiiliohjauksen analysointi ja parantaminen
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 58 sivua
Toukokuu 2017
Automaatiotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Fluid Power
Tarkastaja: professori Kalevi Huhtala

Avainsanat: sähköhydraulinen venttiiliohjaus, EHVA, ohjaustarkkuus, näytteenottoväli, FPGA

Ohjelmistokehitykseen on alettu viime vuosina kiinnittämään entistä enemmän huomiota ja sen myötä ohjelmistojen kehitysprosessia halutaan lyhentää. Tämän työn tarkoituksena on tehdä Wärtsilän sähköhydraulisesta venttiiliohjausjärjestelmästä uuteen kehitysalustaan soveltuvampi versio. Samalla järjestelmän ominaisuuksia halutaan parantaa. Sähköhydraulisen venttiiliohjauksen avulla ohjataan siis polttomoottorin kaasunvaihtoventiileitä ja järjestelmää käytetään tuotekehityksessä erilaisten nokka-akselin profiilien testaamiseen. Ohjaustarkkuus on yksi järjestelmästä vaadituista ominaisuuksista ja tässä työssä esitellään tapoja, joilla siihen pystytään vaikuttamaan. Työn tavoitteena on tehdä uusi yksinkertaisempi implementaatio tämän hetkisestä ohjausmallista. Lisäksi ohjaukselle halutaan löytää sopiva näytteenottoväli, jotta päästään vaatimusten mukaiseen seurantatarkkuuteen ja vältetään prosessorin liialliselta kuormittamiselta.

Uuden implementaatiomallin toimivuutta testattiin ensin prosessimallin avulla, jonka jälkeen sen ominaisuuksia tarkasteltiin testirigillä. Testaustulosten perusteella implementaatiomalli toimii odotetulla tavalla. Venttiilin ohjaustarkkuuteen havaittiin vaikuttavan muun muassa käytetty venttiilin referenssiprofiili, säätimien virittäminen, toimilaitteen ja ieksen välissä olevan välyksen suuruus sekä näytteenottoväli. Suositelluksi näytteenottoväliksi valikoitui 0,1 ms. Näytteenottovälin valinta perustuu seurantavirheen suuruuteen, kun sitä tarkasteltiin absoluuttisen maksimivirheen, keskihajonnan ja toistettavuuden avulla. Moottorilla näytteenottovälin tulee todennäköisesti olla vielä pienempi vaadittuun ohjaustarkkuuteen pääsemiseksi, sillä rigitesteissä ei ole huomioitu moottorin palokammion paineita eikä siitä johtuvaa lämpötilan muutosta. Uuden implementaatiomallin myötä prosessorin laskentakapasiteettiä saatiin hieman pienennettyä. Malli on kuitenkin edelleen raskas, jonka vuoksi osa mallin laskennasta kannattaisi siirtää paremman suorituskyvyn omaavalle mikropiirille, FPGA:lle. Tulevaisuudessa uusi implementaatiomalli otetaan käyttöön tuotekehityksessä käytetyllä testimoottorilla. Pidemmän ajan tulevaisuuden suunnitelmana voitaisiin pitää EHVA-järjestelmän käyttöönottamista myös tuotantomootoreissa, jolloin moottorin tehokkuus olisi mahdollisimman hyvä myös eri käyttöolosuhteissa.

ABSTRACT

HANNA YLINEN: Analysis and Improvement of Electro-Hydraulic Valve Actuation

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 58 pages

May 2017

Master's Degree Programme in Automation Technology

Major: Fluid Power

Examiner: Professor Kalevi Huhtala

Keywords: electro-hydraulic valve actuation, EHVA, valve control accuracy, sample time, FPGA

In recent years the main focus in software development has been to minimize the time used for the software development process. The purpose of this work is to create a more suitable version of the current electro-hydraulic valve actuation system for a new control unit. At the same time, the goal is to improve system properties. Electro-hydraulic valve actuation is used to control the gas exchange valves of an internal combustion engine. The system is used for testing different camshaft profiles during the product development process. Control accuracy is one of the most important features of this system. That is why a few ways to influence it has been presented in this work. The main goal of this work is to make a new simplified implementation of the current control model. In addition, it is important to find the appropriate sample time for the system, so that it is possible to achieve the required control accuracy and avoid overload of the processor.

First, the new implementation model is tested with a process model. After that, its properties are tested on a test rig. According to the test results, the implementation model behaves as wanted. Valve control accuracy depends on the used reference profile, controller tuning, sample time, and size of the clearance between the actuator and yoke. Based on the results the recommend sample time is 0,1 ms. With a real engine drive, the sample time should possibly be even smaller to achieve the required control accuracy. The reason behind it is that the test rig does not take into account the pressure and temperature changes in an engine combustion chamber. Due to the new implementation model, the required computing power of the processor has decreased. Even with the changes made, the model is still heavy and takes a lot of computing power. Therefore, some of the functionalities of the model should be moved to FPGA which has better performance than a traditional processor. In future, the implementation model will be brought into use in the product development processes in a test engine. Further in the future, there is a possibility that the EHVA system could replace the camshaft also in production engines.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Wärtsilälle osana heidän rapid control prototyping projektiansa. Haluan kiittää Jari Hyvöstä mahdollisuudesta tehdä diplomityöni näin mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta. Suuri kiitos kuuluu myös työni ohjaajalle Ari Saikkoselle sekä Tony Gladerille asiantuntevasta ohjauksesta, neuvoista ja keskusteluista koko diplomityöprosessin aikana. Haluan kiittää Jussi Sievystä testirigin kasaamisesta ja tiiviistä tuesta testien aikana. Haluan kiittää myös kaikkia niitä, jotka olivat yrityksen puolesta osallisena tässä työssä ja mahdollistivat siten työni onnistumisen.

Neuvoista ja työni tarkastamisesta haluan kiittää professori Kalevi Huhtalaa. Kiitos myös opiskelukavereilleni, että teitte opiskeluajastani niin mielekästä. Lisäksi haluan kiittää perhettäni ja avopuolisoani Olli Latva-Pukkilaa kaikesta tuesta ja kannustuksesta opiskeluiden ja diplomityöprosessin aikana.

Vaasassa, 23.5.2017

Hanna Ylinen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	TUTKIMUKSEN TAUSTA	3
2.1	Muuttuva venttiiliohjaus	3
2.2	Sähköhydraulinen venttiiliohjaus	6
2.2.1	Järjestelmän keskeisimmät komponentit	7
2.2.2	Venttiilin ohjausmallin toiminnallisuudet	9
2.3	Rapid control prototyping -konsepti	11
2.4	Järjestelmän vaatimukset ja kehitystarpeet	14
3.	SÄÄTÖJÄRJESTELMÄN RAKENNE JA VAATIMUKSET	17
3.1	Säätöjärjestelmän ominaisuudet	18
3.1.1	Tarkkuus	18
3.1.2	Nopeus	19
3.1.3	Jäykkyys	19
3.1.4	Stabiilius	20
3.2	Säätimet	20
3.2.1	PID-säädin	20
3.2.2	Myötäkytkentä	21
3.2.3	Oppiva säädin	22
3.2.4	Mallipohjainen säädin	24
3.2.5	Muita yleisesti käytössä olevia säätimiä	25
3.3	Näytteenottotaajuus	26
4.	IMPLEMENTAATIOMALLIN TOTEUTUS	28
5.	TESTAUSJÄRJESTELMÄN ESITTELY	30
5.1	Testien päämäärä ja vaihtoehtoiset testausmenetelmät	30
5.2	Testauslaitteiston esittely	31
6.	JÄRJESTELMÄN TESTAUS JA ANALYSOINTI	34
6.1	Järjestelmän ominaisuuksien tarkastelu	34
6.2	Sopivan näytteenottovälin valinta	41
7.	TULOSTEN TARKASTELU JA PÄÄTELMÄT	47
7.1	Implementaatiomalli	47
7.2	Ohjaustarkkuus	47
7.3	Proessorin kuormitus	48
7.4	Tulevaisuuden näkymät	49
8.	YHTEENVETO	51
	LÄHTEET	54

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CANape	Kalibrointityökalu
CO	Hiilimonoksidi
CO ₂	Hiilidioksidi
CPU	engl. Central Processing Unit, tavallinen prosessori
EHVA	engl. Electro-Hydraulic Valve Actuation, sähköhydraulinen venttiiliohjaus
FPGA	engl. Field-Programmable Gate Array, digitaalinen mikropiiri
HC	Hiilivety
Miller-ajoitus	Imuventtiilin aikaistettu sulkeutuminen
NO _x	Typen oksidit
Näytteenottoväli	Aikaväli, jonka välein jatkuva-aikaisen signaalin arvoja tarkastellaan
PID	engl. Proportional-Integral-Derivate controller, vahvistava-integroiva-derivoiva säädin
RAM	engl. Random Access Memory, keskusmuisti
Seurantavirhe	Referenssiaseman ja mitatun aseman erotus
SO _x	Rikin oksidit
UNIC	engl. Unified controls, Wärtsilälle räätälöity moottorin ohjausjärjestelmä
W20	Wärtsilän moottori 20 cm sylinterin halkaisijalla
XCP	Yleisesti käytössä oleva mittaus- ja kalibrointiprotokolla
e	erosuure
h	häiriösignaali
K _{ff}	myötähaaran vahvistuskerroin
K _p	P-säätimen vahvistuskerroin
r	käskysignaali
t	aika [s]
u	ohjaussignaali
y	lähtösignaali
γ	oppivan säätimen painotettu oppimiskerroin

1. JOHDANTO

Todellisuudessa järjestelmien erilaisia toimintoja toteutetaan yhä useammin ohjelmistojen avulla. Tästä johtuen ohjelmistokehitykseen kuluva aikaa halutaan lyhentää. Wärtsilässä onkin parhaillaan menossa Rapid control prototyping -projekti, jonka tiimoilta on investoitu uuteen moottorin ohjausyksikköön, Speedgoattiin. Projektin tarkoituksena on nopeuttaa kehitysprosessia ja täten luoda joustavampi moottorin ohjausjärjestelmä tuotekehityksen tarpeita varten. Wärtsilä valmistaa suuritehoisia moottoreita laivoihin ja voimalaitoksiin ja työn tiimoilta keskitytään EHVA-järjestelmään (engl. Electro-Hydraulic Valve Actuation). EHVA-järjestelmän avulla ohjataan moottorin kaasunvaihtventtiileitä sähköhydraulisesti ja sitä kautta vaikutetaan muun muassa moottorin suorituskykyyn ja päästöihin. Järjestelmää käytetään toistaiseksi vain testimootorilla erilaisten nokka-akselin profiilien nopeaan testaamiseen. Tuotantomootoreissa kaasunvaihtventtiileiden ohjaamiseen käytetään nokka-akselia niiden energiatehokkuuden ja edullisuuden vuoksi.

Tällä hetkellä EHVA-mallia ohjataan dSpace ohjausyksiköllä. Mallista halutaan kuitenkin tehdä uusi implementaatio, jotta se soveltuisi paremmin Speedgoatille. Mallin muuttaminen Speedgoatille onkin työn tärkein tavoite. Uuden implementaatiomallin myötä mallin laskentaa halutaan yksinkertaistaa, sillä vanha malli sisältää ajan saatossa sinne jääneitä käyttämättömiä toiminnallisuuksia. Lisäksi mallia on kehitetty usean eri käyttäjän toimesta kiireisellä aikataululla ja tästä johtuen malli on monimutkaisesti toteutettu. Työn yhtenä tavoitteena on myös valita ohjaukselle sopiva näytteenottoväli, jotta päästään vaatimusten mukaiseen seurantatarkkuuteen. Liian pienen näytteenottovälin käyttäminen kuluttaa mikroprosessorin laskentatehoa turhaan ja liian suurella taas heikennetään ohjaustarkkuutta. Tämän hetkinen malli vie lähes koko dSpace ohjausyksikön laskentakapasiteetin, jonka vuoksi uuden implementaatiomallin yhteydessä ollaan kiinnostuneita, kuinka paljon prosessoria kuormitetaan työssä valitulla näytteenottovälillä. Työssä halutaan myös selvittää, tarvitseeko mallin laskentaa siirtää paremman suorituskyvyn omaavalle mikropiirille FPGA:lle (engl. Field-Programmable Gate Array). FPGA:n avulla voidaan toteuttaa kaikki tai osa mallin laskennasta ja täten on mahdollista pienentää prosessorin kuormitusta. Edellä esitettyjen tavoitteiden saavuttamiseksi pohditaan, miten ohjaustarkkuutta voitaisiin parantaa ja mitkä asiat vaikuttavat siihen. Sen lisäksi työssä esitellään erilaisia tapoja pienentää prosessorin kuormitusta.

EHVA-järjestelmän kaltaisia adaptiivisia venttiiliohjaustapoja on kehitetty runsaasti ja niiden ympärillä on tehty paljon tutkimusta muun muassa sopivan säätimen valitsemiseksi. Wärtsilässä käytössä oleva EHVA-järjestelmä on alun perin kehitetty yhteistyössä Tampereen teknillisen yliopiston kanssa ja siihen liittyen on tehty useita julkaisuja. Herranen (2014) on myös tehnyt väitöskirjansa kyseisen järjestelmän kehittämistä. Tämän diplomityön myötä pyritään parantamaan tuolloin tehtyä järjestelmää ja päivittämään sitä vastaamaan nykyisiä tarpeita. Tämän vuoksi työssä ei ole tarkoituksena analysoida valittuja komponentteja kovin syvällisesti, eikä syitä miksi sähköhydraulinen venttiiliohjaus on toteutettu kyseisellä tavalla. Sen sijaan työssä tutustutaan yleisellä tasolla järjestelmän käyttötarkoitukseen ja toteutustapaan. Työssä esitellään yleisesti säätöjärjestelmältä haluttuja ominaisuuksia, sekä tapoja miten näitä ominaisuuksia pystytään parantamaan. Parannustapojen osalta tarkastelu kohdistuu säätimiin ja näytteenottoväliin, sillä niillä pystytään vaikuttamaan merkittävästi järjestelmän ohjaustarkkuuteen, joka on EHVA-järjestelmän käyttäjien kannalta yksi tärkeimmistä ominaisuuksista. Mitä tarkemmin kaasunvaihtoverkkoja pystytään ohjaamaan, sitä tarkempia mittaustuloksia saadaan eri nokkaprofiilien testauksesta. Sopivan nokkaprofiilin avulla taas pystytään parantamaan moottorin tehokkuutta ja vähentämään päästöjä. Lisäksi työssä testataan uuden implementaatiomallin toimivuutta ja sen avulla tutustutaan järjestelmän ohjaustarkkuuteen teoreettisessa tarkastelussa esitettyjä tapoja käyttäen. Implementaatiomallin toimivuutta testataan ensin prosessimallin avulla, jonka jälkeen siirrytään testaamaan järjestelmää testiolosuhteissa.

Työn alussa tutustutaan erilaisiin muuttuviin venttiiliohjaustapoihin, jotta saadaan selkeä käsitys, miten sähköhydraulinen venttiiliohjaus eroaa muista toteutuksista. Tämän jälkeen esitellään tarkemmin EHVA-järjestelmää komponenttien, toiminnallisuuksien ja vaatimusten perusteella. Kolmannessa luvussa perehdytään säätöjärjestelmiltä vaadittuihin ominaisuuksiin, joiden pohjalta otetaan erityistarkasteluun ohjaustarkkuus. Ohjaustarkkuuteen voidaan vaikuttaa esimerkiksi käytetyillä säätimillä sekä valitulla näytteenottotaajuudella. Luvussa esitelläänkin tarkemmin järjestelmän säätimiä sekä vastaavanlaisissa järjestelmissä käytettäviä säätimiä. Neljännessä luvussa tutustutaan uuden implementaatiomallin ominaisuuksiin. Tässä luvussa esitellään erityisesti keskeisimpiä malliin tehtyjä muutoksia. Viidennessä luvussa esitellään vaihtoehtoisia testauslaitteistoja ja kerrotaan, mitä ominaisuuksia järjestelmältä halutaan testata. Tämän jälkeen luvussa 6 analysoidaan testaustulosten avulla ohjaustarkkuutta sekä valitaan tulosten pohjalta ohjauslaitteelle sopiva näytteenottoväli. Työn lopussa tarkastellaan vielä työn aikana saatuja keskeisimpiä tuloksia ja pohditaan EHVA-järjestelmän tulevaisuuden näkymiä.

2. TUTKIMUKSEN TAUSTA

Tässä luvussa perehdytään tutkimuksen lähtökohtiin ja tutkimusongelmiin. Työn tarkoituksena on analysoida ja parantaa käytössä olevaa sähköhydraulista venttiiliohjausta, joka on yksi muuttuvan venttiiliohjauksen toteutustavoista. Lisäksi työssä pyritään löytämään sopiva näytteenottoväli optimaalisella prosessorin kuormituksella.

Luvun alussa vertaillaan muita käytössä olevia muuttuvan venttiiliohjauksen toteutustapoja, jonka jälkeen tutustutaan tarkemmin Wärtsilässä käytössä olevaan venttiiliohjaukseen ja sen toimilaitteisiin. Tämän jälkeen kyseisen järjestelmän toiminnallisuuksista ja ominaisuuksista kerrotaan tarkemmin. Lisäksi vielä selvennetään, miksi tätä järjestelmää halutaan analysoida ja parantaa. Lopuksi selvitetään järjestelmän vaatimukset ja kehitystarpeet työn tavoitteiden avulla.

2.1 Muuttuva venttiiliohjaus

Kasvaneet ympäristöongelmat ja vähentyneet energiavarat ovat aiheuttaneet, että ympäristöä halutaan suojella ja energiaa säästää. Sen myötä lainsäädäntöä ja päästörajoituksia on tiukennettu. (Liu et al. 2016, s. 185–199) Suurin osa polttomoottoreiden epäpuhtauksista on typen oksideja (NO_x), rikin oksideja (SO_x), hiilidioksidia (CO_2), hiilimonoksidia (CO), palamatonta hiilivetyä (HC) ja pienhiukkasia (Lamas & Rodriguez 2012, s. 77). Näitä päästöjä on pyritty vähentämään kehittämällä uusia teknisiä toteutuksia. Polttomoottorista aiheutuvia päästöjä pyritään vähentämään muun muassa:

- Muuttuvalla venttiiliohjauksella
- Pakokaasun takaisinkierätyksellä
- Ajoittamalla polttoaineen ruiskutusta
- Yhteispaineruiskutuksella
- Käyttämällä moottoreissa vaihtoehtoisia polttoaineita, kuten maakaasua (Lamas et al. 2013, s. 493–501).

Päästöjen vähentämisen lisäksi halutaan, että moottori on mahdollisimman tehokas. Valitettavasti suurinta moottorin tehokkuutta ja alhaisimpia päästöjä ei saavuteta samassa pisteessä. Sen lisäksi moottorin toiminta-alue vaihtelee johtuen esimerkiksi kierrosnopeuden ja kuorman muutoksista, joka taas vaatii erilaisia toteutuksia eri tilanteisiin. (Herranen 2014, s. 17) Tässä työssä keskitytään käsittelemään muuttuvaa venttiiliohjausta ja erityisesti sähköhydraulisesti toteutettua venttiilin ohjausta.

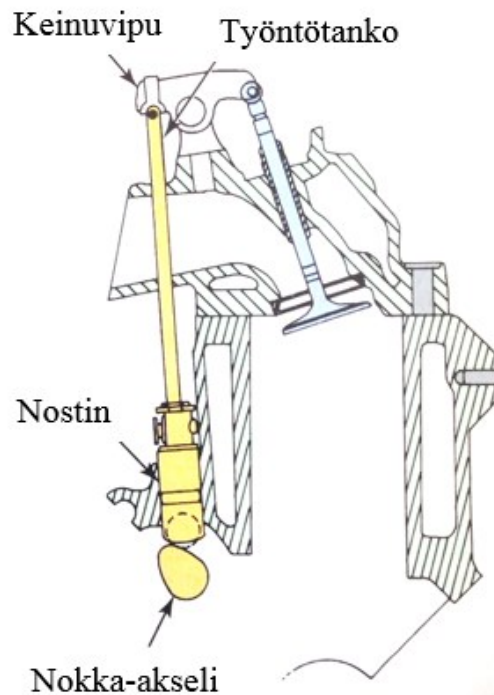
Muuttuvaa venttiiliohjausta käytetään moottorin kaasunvaihtoverkkojen liikkeen ohjaukseen ja tarkkaan ajoittamiseen (Kuva 1). Lisäksi sen avulla voidaan parantaa moottorin vääntömomenttia ja tehokkuutta. Tavallisesti muuttuvassa venttiiliohjauksessa on käytetty lautasventtiiliä kaasunvaihtoverkkojen avaamaan ja sulkemaan moottorin imu- ja pakokanavat. (Kim & Lieu 2007, s. 602)



Kuva 1. *Muuttuvan venttiiliohjauksen vaikutus venttiilin nostoon, ajoitukseen ja muotoon (mukaillen Herranen 2014, s. 17).*

Kuvassa 1 on havainnollistettu muuttuvan venttiiliohjauksen vaikutusta venttiilin liikkeeseen. Muuttuvan venttiiliohjauksen avulla voidaan muokata venttiilin nostoa, ajoitusta ja muotoa. Venttiilin nostolla tarkoitetaan venttiilin nostokorkeutta, kuinka pitkän liikkeen venttiili tekee. Ajoituksella taas vaikutetaan liikkeen ajankohtaan, sen lisäksi sillä vaikutetaan venttiilin liikkeen kestoon. Muuttuvalla venttiiliohjauksella voidaan säädellä myös venttiilin tekemän liikkeen muotoa. Käytännössä tämä tarkoittaa, kuinka pehmeästi venttiilin avautuminen ja sulkeutuminen halutaan toteuttaa.

Muuttuva venttiiliohjaus voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Nämä tavat voidaan jakaa kahteen ryhmään: nokka-akselia käyttäviin järjestelmiin (kuva 2) ja nokka-akselittomiin järjestelmiin. Nokka-akselia käyttävien järjestelmien toiminnallisuus perustuu siihen, että epäkeskon mekaanisen nokan muoto määrää venttiilin ajoituksen, jolloin myös venttiilin liikkeen suuruus riippuu nokan profiilista. (Paden et al. 2015, s. 2654–2665)



Kuva 2. *Nokka-akselipohjainen muuttuva venttiiliohjaus (Halderman 2015, s. 402).*

Nokka-akselittomissa järjestelmissä venttiilin ohjaus voidaan toteuttaa esimerkiksi sähköhydraulisesti tai sähkömagneettisesti, jolloin venttiilin liikettä ei ole rajoitettu. Ne myös mahdollistavat paljon joustavamman venttiilin ohjauksen, mutta ne ovat monimutkaisempia toteuttaa ja täten myös kalliita ja suurikokoisia. Nokka-akselipohjaiset toteutukset ovat taas yksinkertaisempia ja lujatekoisempia, mutta niiden heikkoutena on huono muunneltavuus. Venttiilin ohjausprofiilien muuttaminen edellyttää nokan vaihtamista, joka voi viedä useita päiviä. Sähköhydraulisissa ja sähkömagneettisissa järjestelmissä muutokset voidaan tehdä suoraan sähköiseen ohjausjärjestelmään, jolloin eri venttiiliprofiilien testaus on hyvin nopeaa. Niiden haasteena on kuitenkin suuri tehonkulutus ja vasteajan aiheuttama epätarkkuus ohjauksessa. (Paden et al. 2015, s. 2654–2665) Ohjauksen tarkkuuden parantaminen taas edellyttää vaativien ohjausalgoritmien kehittämistä (Pradeep et al. 2014, s. 1498). Taulukkoon 1 on koottu edellä esitettyjen venttiilitoteutusten ominaisuuksia. Niistä kolme ensimmäistä ovat nokka-akselipohjaisia ja kaksi viimeistä ovat nokka-akselittomia toteutuksia (Hara et al. 2009, s. 320).

Taulukko 1. Venttiiliohjaustapojen vertailu (mukaillen Hara et al. 2009, s. 320).

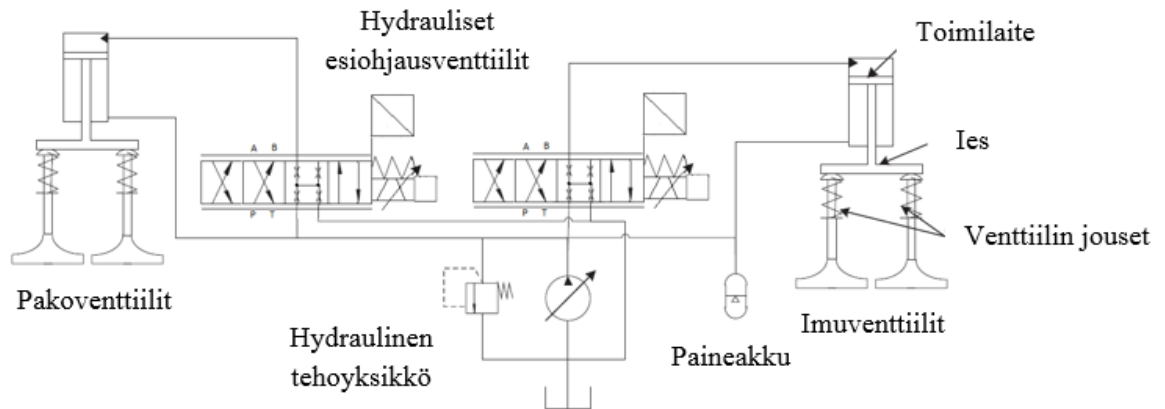
Tyyppi	Yksinkertaisuus	Muunneltavuus	Hinta	Tarkkuus	Energiatehokkuus
Ajoitus	++++	+	++++	++++	++++
Nosto	++++	+	+++	++++	++++
Kesto ja nosto	+++	++	++	++++	++++
Sähkö- Hydraulinen	+	++++	+	+++	+
Sähkö- magneettinen	+	++++	+	+++	+

Taulukossa + -merkkien määrä kuvaa ohjaustavan paremmuutta. Kuvasta nähdään, että mekaaniset nokka-akselipohjaiset toteutukset ovat ominaisuuksiltaan paremmat kuin nokka-akselittomat toteutukset. Nokka-akselipohjaisten toteutusten huono muunneltavuus on kuitenkin testausprosessia merkittävästi hidastava ominaisuus.

Nokka-akselipohjaiset toteutukset ovat laajalti käytössä autoteollisuudessa niiden edullisuuden ja ohjaustarkkuuden ansiosta. Tällä hetkellä myös kaikki Wärtsilän tuotantomootorit käyttävät mekaanista nokka-akselia. Kuitenkin testilaboratoriossa sopivan nokkaprofiilin valitsemiseen käytetään sähköhydraulista venttiiliohjausta. Seuraavassa luvussa tutustutaan tarkemmin Wärtsilän kehittämään versioon.

2.2 Sähköhydraulinen venttiiliohjaus

Wärtsilän sähköhydraulista venttiiliohjausta kutsutaan EHVA:ksi. Tässä työssä käsitelty EHVA-järjestelmä on kehitetty Wärtsilän 6L20 moottorille. Kyseinen moottori on 6-sylinterinen rivimoottori, jonka sylinterin halkaisija on 20 cm. Lisäksi se on nelitahtinen monipolttoainemoottori, jossa voidaan dieselin lisäksi käyttää polttoaineena esimerkiksi nesteytettyä maakaasua. (Wärtsilä 2016, s. 7) Kuvassa 3 on esitelty käytössä olevan EHVA-järjestelmän hydraulikaavio.

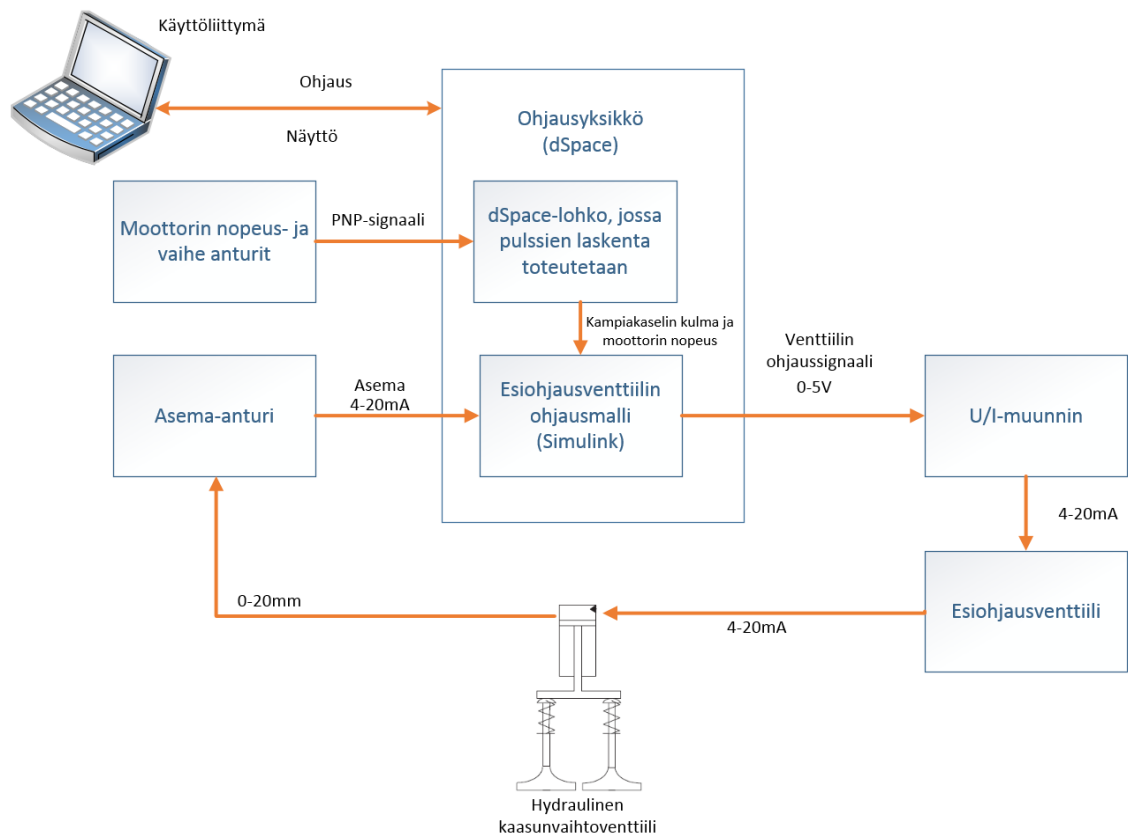


Kuva 3. EHVA-järjestelmän hydraulikaavio (mukaillen Herranen 2014, s. 48).

Jokaisen moottorissa olevan sylinterin yhteydessä on hydraulikaavion mukainen hydraulipiiri. Tosin järjestelmässä on vain yksi hydraulinen tehoyksikkö. Järjestelmässä säätötilavuuspumppu pumppaa hydraulioöljyä öljysäiliöstä kaasunvaihtoverventtiileille ja sähköiselle esiohjausventtiilille. Esiohjausventtiili ohjaa toimilaitetta ja saatuaan ohjaussignaalin se päästää virtauksen lävitseen toimilaitteelle. Kun toimilaitteen yläkammion paine ylittää kaasunvaihtoverventtiileiden jousivoiman ja alemman kammion paineen, niin kaasunvaihtoverventtiilit aukeavat. Tässä tapauksessa yksi esiohjausventtiili liikuttaa samaan aikaan kahta kaasunvaihtoverventtiiliä, sillä ne ovat yhdistetty toisiinsa ieksen avulla. Todellisuudessa ieksen ja toimilaitteen välillä on pieni vällys, joten kaasunvaihtoverventtiileiden liikettä ei ohjata suoraan toimilaitteen avulla. Toimilaitteen alapuolen kammiossa vallitsee vakiopaine, joten kaasunvaihtoverventtiilin sulkeutuessa vakiopaine ja jouset työntävät toimilaitteen yläasentoon, kun toimilaitteen yläkammio on yhdistetty öljysäiliöön. Kaasunvaihtoverventtiileiden jouset takaavat, etteivät venttiilit aukea, vaikka paine palokammiossa olisi korkeampi. Järjestelmässä olevan paineenrajoitusventtiilin ja paineakun tarkoituksena on huolehtia, ettei järjestelmän paine nouse liian korkeaksi. (Herranen 2014, s. 48)

2.2.1 Järjestelmän keskeisimmät komponentit

Sähköhydraulisen venttiiliohjauksen kannalta järjestelmän keskeisimmät komponentit ovat ohjausyksikkö, esiohjausventtiilit, kaasunvaihtoverventtiilit, anturit ja signaalimuuntimet (kuva 4). Tässä luvussa esitellään tarkemmin kaupallisten komponenttien ominaisuuksia.



Kuva 4. EHVA-järjestelmän pääkomponentit ja laitteisto.

Järjestelmän aivoiksi voidaan kutsua moottorin ohjausyksikköä, sillä se vastaanottaa mittaustietoa siihen kytketyiltä antureilta. Se myös käsittelee mittaustietoa algoritmin avulla muodostaen lopulta ohjaussignaalin. (Isermann 2014, s. 275–277) Tällä hetkellä ohjausyksikkönä käytetään dSpacen yksikköä, joka on digitaalipohjainen ja tukee Matlabin Simulinkkiä (dSpace 2013, s.17–18). Tämän työn myötä tullaan siirtymään Speedgoatin valmistamaan ohjausyksikköön, johon tutustutaan paremmin luvussa 2.3. Venttiilin ohjausmalli on siis toteutettu Simulinkilla ja mallin sisällä olevan laskennan tarkastelemiseen ja ohjaamiseen käytetään erillistä tietokoneella olevaa käyttöliittymää. Ohjauksen kannalta keskeisiä anturitietoja ovat kaasunvaihtoventtiilin asema, moottorin nopeus ja kammenkulman suuruus.

Hydraulisten kaasunvaihtoventtiileiden tarkka ohjaus aiheuttaa korkeita vaatimuksia esiohjausventtiilin ominaisuuksille, joiden vuoksi sopivaa kaupallista venttiiliä on vaikea löytää. Järjestelmään on valittu esiohjausventtiiliksi proportionaaliventtiili, sillä servoventtiileissä lämpötilan tai syöttöpaineen muutokset aiheuttavat venttiilin nollapisteeseen ryömintää, joka taas aiheuttaa epätarkkuutta kaasunvaihtoventtiileiden ohjaukseen. (Johnson 2010) Tämän hetkessä järjestelmässä on Parkerin DF plus-sarjan D3FP50Y-venttiili. Venttiilin ohjaus on toteutettu VoiceCoil-keulan avulla. Siinä

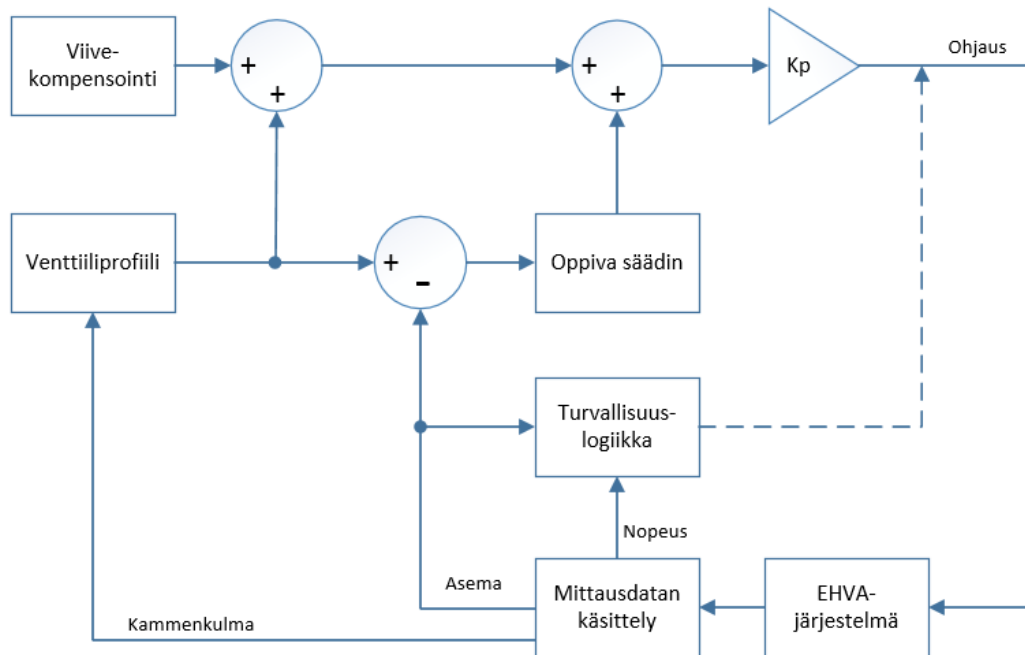
venttiilin kara on yhdistetty liikuteltavaan kelaan, joka liikkuu kestopagneettisylinterin yllä. (Parker Hannifin corporation 2014, s. A61). Venttiilin nimellistilavuusvirta on 100 l/min 35 barin paine-erolla ja sen taajuusvaste on 200 Hz rajataajuuden ollessa -3dB. Lisäksi venttiilin avulla voidaan ohjata portaattomasti toimilaitetta 4–20 mA ohjausvirralla. (Parker Hannifin corporation 2013, s.3–94) Aikaisemman kokemuksen perusteella on huomattu, että kyseinen venttiili on juuri ja juuri riittävän nopea nykyiseen järjestelmään. Markkinoilla on hieman nopeampia venttiileitä, mutta niiden läpäisemät tilavuusvirrat ovat liian pieniä, jotta ne soveltuisivat tähän järjestelmään.

Proportionaaliventtiili tarvitsee ohjaussignaalikseen analogisen virtaviestin, joten mallista saatu digitaalinen ohjaussignaali tulee viedä U/I-muuntimen kautta venttiilille. Järjestelmässä käytetään tällä hetkellä ABB:n CCE/STD-muunninta, jonka kaistanleveys -3dB:n rajataajuudella on 2 kHz. Käytössä olevan muuntimen vasteaika on 200 µs. (ABB 2016, s.283) Hydraulisten kaasunvaihtoverkköiden aseman mittauksessa käytetään Positekin LIPS P846 lineaariasema-anturia. Sen ohjaussignaalina käytetään 4–20 mA:n virtaviestiä. Kaasunvaihtoverkköiden maksimiliike on 17 mm, joten anturin mitta-alueeksi on valittu 0–20 mm. (Positek Ltd 2017) EHVA-järjestelmässä asema-anturi on sijoitettu mittaamaan kaasunvaihtoverkköitä liikuttelevan toimilaitteen liikettä, joten se ei itse asiassa mittaa kaasunvaihtoverkköiden todellista asemaa.

Moottorin nopeuden ja kampiakselin kulman suuruuden mittaamiseen käytetään Wärtsilälle kustomoituja induktiivisia pulssiantureita. Anturi lähettää positiivisen PNP-tyyppisen jännitesignaalin tunnistessaan moottorin vauhtipyörässä olevan reiän. Vauhtipyörässä on 120 reikää tasaisin välein, jolloin yksi reikäväli vastaa 3 asteen muutosta kampiakselin kulmissa. Näiden jännitesignaalien perusteella dSpacen toimintalohkossa lasketaan Simulink-mallille vietävä moottorin nopeus ja kampiakselinkulma.

2.2.2 Venttiilin ohjausmallin toiminnallisuudet

Moottorin jokaisella sylinterillä on oma esiohjausventtiili imu- ja pakopuolella. Tämä 6-sylinteriselle moottorille tehty järjestelmä sisältää siis kokonaisuudessaan 12 esiohjausventtiiliä ja jokaiselle venttiilille on oma ohjauksensa. Eri sylintereiden välillä ohjausmallit ovat kuitenkin keskenään identtiset, ainoastaan alkuarvot ja anturitiedot vaihtelevat. Seuraavaksi tutustutaan hieman tarkemmin mallin sisällä oleviin päätoiminnallisuuksiin. Malli koostuu karkeasti katsoen mittausdatan käsittelylogiikasta, turvallisuuslogiikasta ja itse venttiilin ohjauslogiikasta, joka sisältää venttiilin profiilin luonnin sekä järjestelmässä olevat säätimet (kuva 5). Nämä toiminnallisuudet ovat myös uudessa implementaatiossa, sillä mallin toiminnallisuuksia ei haluttu muuttaa.



Kuva 5. Periaatekuva järjestelmän toiminnallisuudesta.

Mittausdatan käsittelylogiikassa tuodaan malliin antureilta tuleva mittausdata kaasunvaihtoverteilleiden asemasta, moottorin kierrosnopeudesta ja kampiakselin kulman suuruudesta. Näitä anturitietoja muokataan sopivaan muotoon muun muassa skaalauksen ja kalibroinnin avulla. Siellä toteutetaan myös tarvittavat lisäykset, esimerkiksi kampiakselin kulman mittausdataan lisätään jokaiselle sylinterin sisälle tulevalle kulmalle sopiva vaihe-ero, joka on riippuvainen sylinterin sytytysvälistä.

Venttiilin ohjauslogiikassa luodaan venttiilille referenssi- ja ohjausprofiili sen hetkisen kammenkulman perusteella. Referenssiprofiili on käyttäjän asettama profiili, joka vastaa testattavan nokan muotoa. Ohjausprofiili on taas referenssiprofiiliin perustuva profiili, jota muokataan mallin sisällä olevien toimintojen avulla, jotta venttiili seuraisi mahdollisimman hyvin referenssiprofiilia. Tämän tarkastelemiseen käytetään mallissa seurantavirhettä. Seurantavirhe tarkoittaa mitatun venttiilin aseman poikkeamaa referenssiasemasta. Seuraavaksi esitellään toimintoja, joiden avulla mallissa parannetaan ohjaustarkkuutta.

Järjestelmässä olevien säätimien avulla pienennetään venttiilin hydraulisen viiveen, kuormavoiman ja seurantavirheen vaikutusta venttiilin ohjaustarkkuuteen. Tämän vuoksi mallissa käytetään P-säädintä, mallipohjaista säädintä, oppivaa säädintä ja myötäkytkentää. P-säädintä käytetään signaalin vahvistamiseen ja mallipohjaista säädintä taas viiveen kompensointiin. Viiveen kompensoinnin avulla ennakoitua hydraulinen viive eli aika, joka venttiilillä kestää ennen kuin se reagoi annettuun ohjaussignaaliin. Viiveen kompensoinnissa verrataan mitattua asemaa ja referenssiasemaa tiettyyn venttiiliprofiilin pisteeseen, jonka avulla pystytään päättelemään viiveen suuruus ja

suunta kampiakselin kulmissa. Tämä viive viedään lopulta ohjausprofiilille. Viiveen kompensoinnissa kompensoidaan ensin venttiilin avautumisviive, jonka jälkeen vasta sulkeutumisviive. Kun venttiilin avautumisen ja sulkeutumisen viiveet ovat tarpeeksi pienet, otetaan käyttöön oppiva säädin, jonka tarkoituksena on oppia aikaisemmista säädöistä ja muodostaa korjaussumma sen perusteella. Myötäkytkentää taas käytetään venttiilin kuormavoiman kompensoimiseen. Näiden säätimien ominaisuuksia esitellään tarkemmin luvussa 3.2.

Turvallisuuslogiikka huolehtii, että venttiili ei osu mäntään missään vaiheessa. Sen toiminta jaetaan kahteen kokonaisuuteen, sen mukaan tapahtuuko turvallisuustarkastelu ennen mallin ohjausta, vai ohjauksen aikana. Ennen ohjausta tapahtuvana virhetilanteena voidaan pitää liian alhaista moottorin kierrosnopeutta, jonka seurauksena venttiilin ohjausta ei toteuteta. Ohjauksen aikana tapahtuva tarkastelu voi liittyä esimerkiksi seurantavirheen suuruuteen tai mäntäkontaktiin. Vikatilanteen sattuessa ohjataan venttiili turvalliseen asemaan, joka usein tarkoittaa venttiilin sulkemista. Vikatilanteen tapahduttua käyttäjä pystyy mallin lähettämän virhesignaalin avulla paikantamaan virheen sijainnin. Edellä esiteltyjen toimintojen lisäksi mallissa on mahdollista käyttää virtuaalista kierrosnopeutta ja kammukulmaa, mitatun anturitiedon sijaan. Virtuaalisia toimintoja käytetään testirigillä, jolloin varmistetaan mallin turvallinen testaaminen ennen moottoritesteihin siirtymistä.

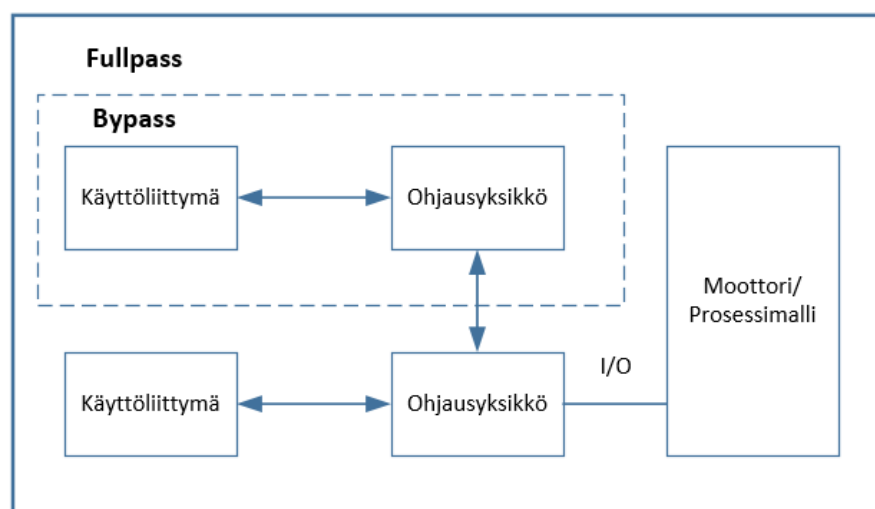
2.3 Rapid control prototyping -konsepti

Yhä enemmän järjestelmien toiminnoista toteutetaan ohjelmiston avulla ja siksi kiinnostus ohjelmistojen kehitysprosessia kohtaan on kasvanut. Erään ennusteen mukaan 90 % autoteollisuuden toiminnoista tullaan tulevaisuudessa toteuttamaan ohjelmistojen avulla (Bringmann & Krämer 2008, s.485). Wärtsilässä onkin tällä hetkellä meneillään tutkimusprojekti, jonka tarkoituksena on kehittää joustavampi moottorin ohjausjärjestelmä kehityskäyttöön. Tutkimusprojektin myötä on investoitu uuteen Rapid control prototyping- kehitysalustaksi tarkoitettuun Speedgoat real time target -yksikköön.

Rapid control prototyping -konseptin tarkoituksena nopeuttaa testausprosessia, sillä siinä ohjelmiston toiminnallisuus testataan jo kehitysprosessin alkuvaiheessa. Sen avulla voidaan myös säästää kustannuksissa, sillä mitä aikaisemmassa vaiheessa ohjelmistokehityksen virheet havaitaan, sitä pienemmät kustannukset niistä aiheutuu. (Santos et al. 2015, s.1342) Aikaisemmassa testausjärjestelmässä käytettiin kahta erillistä ohjausyksikköä, dSpacen valmistamaa yksikköä ja UNICia (engl. Unified controls). Dspace:n ohjausyksikköä käytetään EHVA-järjestelmän ohjaukseen. Muiden moottorin toimintojen ohjaus, kuten esimerkiksi moottorin turvallisuuslogiikka on toteutettu Wärtsilälle räätälöidyn UNICin avulla, joka on moottoriin sulautettu järjestelmä. Kustomoinnin ansiosta ohjausyksikkö kestää äärimmäisissäkin moottorin

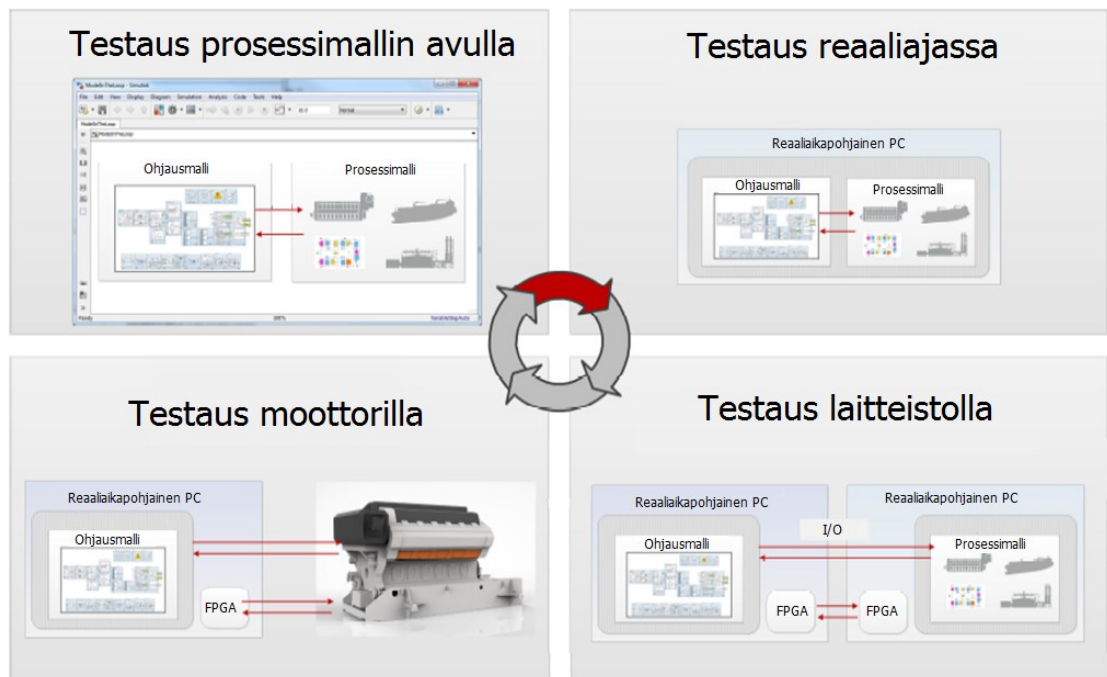
toimintaolosuhteissa. (Wärtsilä engine services 2016, s. 1) UNIC:n heikkoutena on sen jäykkyys, sillä muutoksen toteuttaminen vaatii usean vaiheen läpikäynnin. Pahimmassa tapauksessa joudutaan tekemään muutoksia myös ohjelmistoarkkitehtuuriin. Tämä kasvattaa työmäärää ja täten hidastaa merkittävästi moottorin kehitysprosessia. Uuden investoinnin myötä dSpace korvataan Speedgoatilla ja osa UNIC:ssa toteutetuista ohjauksista siirretään Speedgoatille. Uuden konseptin suurin hyöty on, että moottorin ohjausmalli voidaan testata ja kalibroida lähes täysin, ennen kuin se otetaan käyttöön moottorilla. Aikaisemmin moottorin ohjausmalleihin tehtyjen toimintojen muutokset testattiin vasta moottorilla, mutta nykyisen menettelytavan mukaan ne voidaan testata jo simulointivaiheessa. Kalibrointi ei kuitenkaan ole vielä mahdollista, sillä se vaatisi tarkempia moottorin simulointimalleja.

Rapid control prototyping -periaatteen mukaan mallin testaus voidaan toteuttaa joko fullpassina tai bypassina. Tätä on havainnollistettu kuvassa 6. Fullpassilla tarkoitetaan, että alkuperäinen ohjausmalli korvataan täysin uudella ohjausmallilla. Siinä ohjausmalli ladataan ohjausyksikölle, joka on yhteydessä moottoriin, jota voidaan ohjata käyttöliittymän avulla. Bypassingissa vähintään kaksi ohjausyksikköä on asetettu rinnan. Toinen niistä toimii pääyksikkönä, jonka sisälle on ladattu alkuperäinen malli. Alkuperäisessä mallissa toteutetaan kaikki muuttumattomat ohjaukset, sillä välin kun muutettujen ohjauksien laskenta on toteutettu toisessa ohjausyksikössä. Ohjausyksiköistä pääyksikkö on suoraan yhteydessä moottoriin tai prosessimalliin. Bypassingin avulla on siis tarkoitus testata vain yksittäisten ohjausten toimivuutta. (Höltkä et al. 2004, s. 1) Wärtsilässä bypass on toteutettu Speedgoatin ja UNIC:n avulla. Speedgoatin avulla toteutetaan jokin tuotantomootorin toiminnoista korvaamalla alkuperäinen UNIC:ssa pyörivä toiminto parannellulla versiolla.



Kuva 6. Rapid control prototyping toteutustavat (mukaillen Höltkä et al. 2004, s.1).

Ennen moottoritestejä halutaan varmistua, että ohjausmalli toimii odotetusti. Sitä varten ohjausmallia testataan aluksi prosessimallin avulla. Tämän jälkeen siirrytään testaamaan ohjausmallia reaaliaikapohjaisella tietokoneella. Se eroaa edellisestä testauksesta laskentatavaltaan, sillä nyt mallin laskenta tehdään reaaliajassa, jolloin myös laskenta on tarkempaa (Belanger et al., s. 38). Tämän jälkeen ohjausmallia voidaan vielä testata todelliseen ohjausyksikköön kytkettynä. Näin varmistutaan, että sisään- ja ulostulosignaalien viestit toimivat. Näiden vaiheiden jälkeen malli on valmis moottoritesteihin. Mikäli ohjausmalliin halutaan tehdä uusia muutoksia, tulee sen testaus aloittaa alusta edellä esitetyn menettelytavan mukaisesti. (Bringmann & Krämer 2008, s.486–487) Kuvassa 7 on havainnollistettu testauksen eri vaiheita.



Kuva 7. Testausprosessin työnkulku (Wärtsilä 2017).

Seuraavaksi tutustutaan Speedgoatin ja dSpacen ohjausyksiköiden ominaisuuksiin. Vertailu kohteeksi on valittu dSpace, sillä sen avulla on aikaisemmin ohjattu EHVA-järjestelmää. Taulukkoon 2 on koottu näiden ohjausyksiköiden ominaisuuksia.

Taulukko 2. *EHVA-järjestelmässä käytettyjen ohjausyksiköitten vertailu (Speedgoat 2017)(dSpace 2007, s. 3).*

Tekniset ominaisuudet	Speedgoat	dSpace
Laite	Performance real-time target machine	Modular hardware
Proessori ydinten määrä	4	1
CPU	Intel core i7/ 3,5 GHz	IBM PPC 750GX/ 1 GHz
RAM	4 000 MB	128 MB
FPGA	Xilinx spartan 6	Ei käytössä Wärtsilässä

Taulukosta 2 nähdään Speedgoatin olevan teknisiltä ominaisuuksiltaan huomattavasti dSpacea tehokkaampi. Niiden arkkitehtuuri on kuitenkin toteutettu eri tavalla, joten ne eivät ole täysin vertailukelpoisia. Dspacen laitteessa on käytössä kaksi prosessoria, jonka lisäksi siinä on apuprosessori sen laajennuskortissa. Speedgoatin toteutuksessa on vain yksi prosessori ja mahdolliset laskentakapasiteetin lisäykset tulee tehdä FPGA:na avulla. Molemmissa ohjausyksiköissä on FPGA-tuki, joka on tarkoitus ottaa käyttöön uuden ohjausyksikön myötä, sillä se mahdollistaa entistä nopeamman laskentanopeuden. FPGA:n avulla päästään jopa megahertsin näytteenottotaajuuteen (Speedgoat 2017).

2.4 Järjestelmän vaatimukset ja kehitystarpeet

EHVA-järjestelmää käytetään moottorin erilaisten nokka-akseliprofiilien nopeaan testaamiseen. Nokkaprofiilien avulla vaikutetaan moottorin tehokkuuteen ja päästöjen suuruuteen, joten järjestelmän on pystyttävä ohjaamaan kaasunvaihtoverteilleitä mahdollisimman tarkasti, jotta saadaan luotettavaa tietoa testatuista profiileista. Venttiilin tulisi seurata haluttua referenssiprofiilia 0,5–1 mm tarkkuudella, joka tarkoittaa 3 asteen tarkkuutta kampiakselin kulmissa. Tosin vaadittava seurantatarkkuus vaihtelee venttiiliprofiilin eri kohdissa. Kriittisin kohta, jossa seurantavirhe saa olla enintään 0,5 mm sijaitsee kaasunvaihtoverteilin todellisessa avautumis- ja sulkeutumispisteessä. W20 moottoreilla tämä tapahtuu, kun venttiilin asema on 2 mm kohdassa. Seurantavirhe tässä kohdassa voi aikaistaa tai viivästyttää venttiilin avautumista tai sulkeutumista, jolloin esimerkiksi kaasunsyöttö viivästyy tai aikaistuu. Se taas heikentää moottorin palamisprosessia ja täten muun muassa moottorin tehokkuutta. Toisaalta seurantavirhe voi olla jopa 1 mm luokkaa venttiilin ollessa täysin auki, sillä silloin se ei vaikuta niin merkittävästi venttiilin kanavan läpi meneviin virtauksiin.

Venttiilin ohjaustarkkuuden lisäksi on tärkeää, että venttiilien ohjaus on toistettavissa mahdollisimman samankaltaisena eri syklien ja sylintereiden välillä (Zongxuan & Zhu

2014, s. 24). Se takaa, että palamisprosessit ovat mahdollisimman samanlaiset, jolloin moottori pysyy tasapainossa ja päästään mahdollisimman korkeaan moottorin suorituskykyyn. (Herranen 2014, s.35) (Zongxuan & Zhu 2014, s. 24). Tärkeintä on, että huuhteluvaihe eli pakovernttiilin sulkeutuminen ja imuventtiilin avautuminen tapahtuvat mahdollisimman samankaltaisesti. Sen lisäksi on tärkeää, että imuventtiilin sulkeutuminen on mahdollisimman samanlainen, sillä se vaikuttaa Miller- ajoitukseen. Miller-ajoitusta käytetään imuventtiilin sulkeutumisen aikaistamiseen, jotta saataisiin parannettua moottorin suorituskykyä tai vähennettyä No_x -päästöjä. Moottorin kierrosnopeus vaikuttaa toistettavuuteen, sillä se ei pysy vakiona vaan muuttuu kuormituksen vaihdellessa. Tämä aiheuttaa heilahtelua myös venttiilin ohjaukseen. (Zongxuan & Zhu 2014, s. 28)

Järjestelmän Simulink-mallissa tulee käyttää sille optimoitua näytteenottoväliä, eli aikaväliä, jonka välein signaalista otetaan näytteitä. Liian pienen näytteenottovälin käyttäminen kuormittaa turhaan prosessoria ja voi joissain tilanteissa johtaa prosessorin ylikuormittumiseen. Liian iso näytteenottoväli taas huonontaa ohjaustarkkuutta. Aikaisempi ohjaus EHVA-mallista on tehty dSpace ohjausyksikölle ja siinä käytetään pienintä mahdollista näytteenottoväliä (0,25 ms), jolloin malli käyttää keskimäärin noin 80 % prosessorin laskentatehosta. Uudessa Speedgoat toteutuksessa EHVA-malli on vain yksi kaikista moottorin ohjausmalleista, toisin kuin dSpace toteutuksessa, jossa se oli ainut ohjausmalli. Täten on toivottavaa, että EHVA-mallin vaatimaa laskentatehoa saataisiin pienennettyä ja selvitettyä tarkemmin, mikä tekee siitä niin raskaan. Tämän työn myötä mallista tullaan tekemään yksinkertaisempi ja vähemmän laskentatehoa vievä implementaatio kuitenkin niin, että kaikki toiminnallisuudet pysyvät samoina.

Kuten luvussa 2.2 todettiin, venttiiliohjaus perustuu mitattuun tietoon kampiakselin kulmasta, jonka perusteella valitaan ennalta määritellystä venttiiliprofiilista venttiilille sopiva ohjaus. Kampiakselin kulman laskenta pohjautuu käytettyyn kierrosnopeuteen. Mitä suurempaa moottorin kierrosnopeutta käytetään, sitä pienempää näytteenottoväliä tulee käyttää, jotta päästään haluttuun tarkkuuteen (Zongxuan & Zhu 2014, s.31). W20 moottorin nimelliskierrosnopeus on 1200 rpm, jolloin esimerkiksi pakovernttiilin isku kestää 33 ms. Tämän perusteella taulukkoon 3 on laskettu suuntaa antava tarkkuus kammenkulmissa eri näytteenottoväleillä.

Taulukko 3. *Suuntaa-antava ohjaustarkkuus kammenkulmissa eri näytteenottoväleillä.*

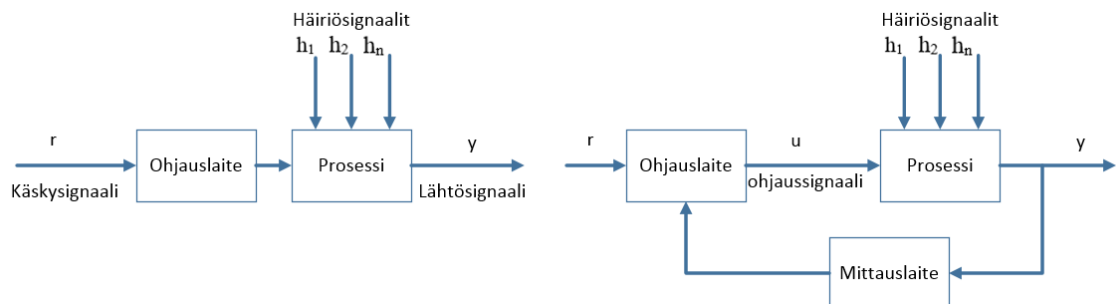
Näytteenottoväli [ms]	Kampiakselin kulma [aste]
0,1	1,09
0,2	2,18
0,3	3,27
0,4	4,36
0,5	5,45
0,6	6,54

Taulukon pohjalta käytetyn näytteenottovälin tulisi olla vähintään 0,2 ms, jotta venttiilin asematieto päivitetään mallissa alle 3 kammenkulma-asteen välein. Imuventtiilin isku kestää vielä vähemmän aikaa, joten mallissa tuleekin käyttää pienempää näytteenottoväliä.

3. SÄÄTÖJÄRJESTELMÄN RAKENNE JA VAATIMUKSET

Tämän luvun tarkoituksena on esitellä säätöjärjestelmän rakennetta ja siltä tavallisesti vaadittuja ominaisuuksia. Ominaisuuksia voidaan parantaa muun muassa sopivien säätimien ja näytteenottovälin avulla. Näistä syistä tässä luvussa esitellään tarkemmin myös järjestelmässä käytettyjä säätimiä, sekä tutkitaan millaisia säätimiä käytetään vastaavanlaisissa järjestelmissä. Tämän jälkeen tarkastellaan käytetyn näytteenottovälin vaikutusta ohjaustarkkuuteen ja laskentatehoon. Lopuksi vielä esitellään tavallisen prosessorin rinnalle kehitetyn FPGA-tekniikan tuomia etuja.

Ohjaustapansa mukaan järjestelmät voidaan jaotella ohjausjärjestelmiin ja säätöjärjestelmiin (kuva 8). Ohjausjärjestelmässä haluttua suuretta, esimerkiksi asemaa ohjataan pelkän käskysignaalin avulla. Säätöjärjestelmä eroaa ohjausjärjestelmästä siinä olevan takaisinkytkennän myötä. Takaisinkytkentä mahdollistaa, että ohjaukseen vaikutetaan myös järjestelmän käyttäytymistä kuvaavan mittasignaalin avulla. Takaisinkytkennän ansiosta säätöjärjestelmä sietää ulkoisia ja sisäisiä häiriöitä paremmin kuin ohjausjärjestelmä. Säätöjärjestelmä on kuitenkin alttiimpi värähtelylle. (Kauranne et al. 2008, s.7,328)



Kuva 8. Vasemmalla periaatekuva ohjausjärjestelmästä ja oikealla säätöjärjestelmästä (mukaillen Fonselius et al. 2006, s.12).

Tavallisesti säätöjärjestelmät koostuvat kolmesta peruselementistä, jotka ovat ohjauslaite, prosessi ja mittauslaite. Ohjauslaitteella tarkoitetaan tavallista tietokonetta tai ohjelmoitavaa logiikkaa, joka käskysignaalin perusteella muodostaa ohjaussignaalin, jonka avulla taas vaikutetaan prosessiin. Prosessi kuvaa järjestelmää, jonka yhtä tai useampaa suuretta yritetään hallita. Häiriöt vaikuttavat prosessiin, jonka vuoksi käskysignaali ei vastaa suoraan lähtösignaalia. Häiriöt aiheutuvat esimerkiksi järjestelmän kitkoista, vuodoista ja nesteen viskositeetista. Mittauslaite on anturi, joka

mittaa halutun suureen käyttäytymistä. Tällainen suure voisi olla esimerkiksi venttiilin asema. (Fonselius et al. 2006, s. 8,11)

EHVA-järjestelmässä olevan takaisinkytkennän vuoksi sitä kutsutaan servojärjestelmäksi. Säädettyään suurena on asema, joten kyseessä on asemaservojärjestelmä. Perinteiset servojärjestelmät on toteutettu pelkkien analogisten signaalien avulla, mutta digitalisaation myötä digitaalisten signaalien määrä on kasvanut, sillä ne mahdollistavat tehokkaammat keinot järjestelmän ohjaukseen. Sähköhydrauliset servojärjestelmät voidaan luokitella ohjaus- ja mittauslaitteessa käytettyjen signaalityyppien perusteella. (Fonselius et al. 2006, s. 77–78) EHVA-järjestelmää voidaan tämän luokittelun perusteella sanoa analogisesti ohjatuksi analogiseksi servojärjestelmäksi, sillä aseman mittauksessa käytetään analogista anturia ja ohjauslaitteelle tuleva signaali on analoginen.

3.1 Säätojärjestelmän ominaisuudet

Tavallisesti säätojärjestelmiltä vaaditaan suurta tarkkuutta, nopeutta, jäykkyyttä ja stabiiliutta. Valitettavasti nämä ominaisuudet ovat osaltaan toisiaan poissulkevia, joten niiden välillä täytyy tehdä kompromisseja. Seuraavaksi tutustutaan tarkemmin, mitä näillä ominaisuuksilla tarkoitetaan ja miten niitä voitaisiin parantaa servojärjestelmissä.

3.1.1 Tarkkuus

Tarkkuudella tarkoitetaan, kuinka tarkasti järjestelmä seuraa asetusarvon muutoksia. Järjestelmän tarkkuuteen vaikuttaa siinä olevien komponenttien ominaisuudet. Järjestelmä ei voi esimerkiksi olla tarkempi, kuin siinä käytetyt anturit (Hehn 1993, s.169). Mittaustarkkuuteen vaikuttaa anturin resoluutio, jonka pitäisi asemointitehtävissä olla noin 2–10 kertaa suurempi, kuin haluttu ohjaustarkkuus. Lisäksi anturin sijoituskohdalla on vaikutusta tarkkuuteen. Yleensä se kannattaa sijoittaa mahdollisimman lähelle toimilaitetta, jotta tarkkuus on mahdollisimman hyvä. Venttiilin ollessa järjestelmässä toimilaitteena, järjestelmän tarkkuuteen vaikuttavat muun muassa venttiilin kuollut alue, hystereesi ja kitkat. (Fonselius et al. 2006, s. 174, 184) Tarkkuutta tarkasteltaessa on huomioitava myös ympäristön aiheuttamat ulkoiset vaikutukset. Moottoritoteutuksissa tällaisia asioita ovat mekaaninen värinä, palokammiossa vaikuttava paine ja lämpötilan muutokset. (Sun & Cleary 2003, s. 3120)

Järjestelmän ohjaustarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä järjestelmässä takaisinkytkentää sekä kasvattamalla vahvistuskertoimia ja lajilukua. Asematakaisinkytkennän lisäksi järjestelmään voidaan tuoda muitakin lisätakaisinkytkentöjä (esimerkiksi nopeus, kiihtyvyys, paine), jotta saadaan toteutettua vaaditut tarkkuus- ja nopeusvaatimukset. Tosin niiden lisäksi tarvitaan vielä erilaisia

säätimiä. Järjestelmän lajiluku kertoo, kuinka monta kertaa erosuure integroidaan myötähaarassa. Lajiluvun kasvattaminen voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia järjestelmän stabiiliuteen. Asemaservoissa järjestelmä on yksinkertaisimmillakin säätöalgoritmeilla lajilukua 1, sillä toimilaite on itsessään integroiva elin. Tarkkuuden kannalta edullisinta on pyrkiä aina lajiluvun 1 järjestelmään. (Fonselius et al. 2006, s.32–33)

3.1.2 Nopeus

Nopeudella tarkoitetaan vasteen nopeutta, eli kuinka nopeasti järjestelmän lähtösignaali reagoi asetusarvon muutoksiin. Sen kuvaamiseen käytetään rajataajuutta, joka saadaan suljetun piirin taajuusvasteesta. Rajataajuus kertoo tietyn taajuuden, jota suurempia taajuuksia järjestelmä ei pysty seuraamaan. Sen ilmaisemiseen käytetään tulo- ja lähtösignaalien välistä vaihesiirtoa tai amplitudisuhdetta. Vaihesiirron suuruus määritetään -90° taajuuskaistasta, kun taas amplitudisuhde määritetään -3 dB taajuuskaistasta. Rajataajuutta suuremmilla taajuuksilla vaihe-ero kasvaa sallittua suuremmaksi ja amplitudisuhde puolestaan putoaa liian pieneksi. Hydraulisissa servojärjestelmissä rajataajuuden määrittämiseen käytetään yleensä vaihesiirtoa, joka voidaan lukea esimerkiksi Bode-diagrammista. (Fonselius et al. 2006, s.31)

Järjestelmä pystyy seuraamaan sitä suurempia taajuuksia, mitä suurempaa rajataajuutta siinä käytetään. Tällöin myös järjestelmän nopeus kasvaa. Järjestelmän nopeutena on usein viisasta pitää hitainta järjestelmän vaatimusten täyttämää nopeutta, sillä nopeuden lisääminen kasvattaa komponenttien kokoa, painoa, järjestelmän energian tarvetta sekä aiheuttaa värähtelyä. Järjestelmän nopeuteen voidaan vaikuttaa erilaisten vahvistusten avulla. (Fonselius et al. 2006, s.31)

3.1.3 Jäykkyys

Jäykkyys kuvaa järjestelmän kykyä sietää kuormavoiman vaihteluista johtuvaa joustamista. Kuormanvaihtelut vaikuttavat järjestelmässä vaikuttavaan painetasoon ja sitä kautta esimerkiksi asemaservojärjestelmissä toimilaitteen tarkkuuteen. (Kauranne et al. 2008, s. 328) Takaisinkytkennän avulla järjestelmän jäykkyyttä saadaan kasvatettua, sillä takaisinkytkentähaara havaitsee kuormasta aiheutuvan vaihtelun ja korjaa sen mukaan toimilaitteen ohjausta (Fonselius et al. 2006, s. 84). Järjestelmän jäykkyyden kasvattaminen edellyttää, että järjestelmässä olevat komponentit yltyvät haluttuun jäykkyyteen (Fonselius et al. 2008, s. 22). Järjestelmän jäykkyyttä kohennetaan parantamalla mittaushaaran tarkkuutta eli anturin ominaisuuksia ja kasvattamalla vahvistuskerrointa (Fonselius et al. 2006, s. 84).

3.1.4 Stabiilius

Stabiilius kuvaa järjestelmän tulo- ja lähtösignaalien välistä vakautta. Epästabiilissa järjestelmässä häiriöstä johtuvan amplitudin värähtely kasvaa teoriassa rajatta. Todellisuudessa näin ei kuitenkaan ole, sillä järjestelmän epälineaarisuudet asettavat värähtelyn tietylle tasolle. Järjestelmän epästabiiliutta pyritään parantamaan säädön avulla. Säätojärjestelmät ovat herkempiä värähtelylle niissä olevan takaisinkytkennän vuoksi. Järjestelmän stabiiliuden arvioimiselle on useita eri menetelmiä. Stabiiliuden arvioimiseen voidaan käyttää muun muassa Routh-Hurwitzin kriteeriä, askelvastetta tai avoimen piirin taajuusvastetta. (Fonselius et al. 2006, s.28–30)

3.2 Säätimet

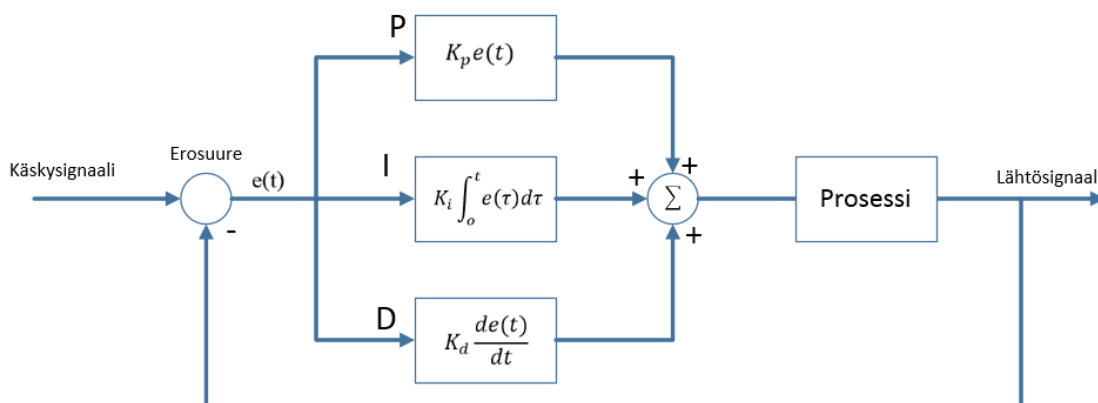
Säätimiä käytetään järjestelmässä paremman vasteen saamiseksi. Yleisesti aina pyritään käyttämään mahdollisimman yksinkertaisia säätimiä vaaditun tarkkuuden saavuttamiseksi. Kuitenkin esimerkiksi suuria viiveitä sisältävissä järjestelmissä tai monimuuttuja toteutuksissa kannattaa usein käyttää monimutkaisempia säätimiä (Majanne 2015). Monimutkaisten säätimien avulla pystytään nimittäin vaikuttamaan paremmin järjestelmän käyttäytymiseen. Säätimen valinnassa kannattaakin ensin kokeilla mahdollisimman yksinkertaisen säätimen sopivuutta, jonka jälkeen vasta tarpeen mukaan harkita monimutkaisempiin säätimiin siirtymistä. Sopivan säätimen löydyttyä tulee se vielä virittää järjestelmälle sopivaksi, eli pyrkiä sopivien säätimen parametrien avulla parantamaan vasteen ominaisuuksia. Säätimen virityksellä on usein suuri merkitys järjestelmän toiminnalle, joten säädettävyyden kannalta on eduksi, mitä suuremmalla välillä parametrien arvoja voidaan vaihdella. (Fonselius et al. 2006, s. 174–177)

Tällä hetkellä EHVA-järjestelmässä käytettyjä säätöratkaisuja ovat P-säädin, myötäkytkentä, oppivasäädin, ja mallipohjainen säädin, jota käytetään viiveen kompensointiin. Näiden säätimien ominaisuuksia tullaan tarkemmin esittelemään seuraavissa alaluvuissa. Sen lisäksi tässä yhteydessä esitellään EHVA-järjestelmän kaltaisissa järjestelmissä käytettyjä säätimiä.

3.2.1 PID-säädin

PID-säädin on yleisin käytössä oleva säädintyyppi ja se koostuu vahvistavasta (P), integroivasta (I) ja derivoivasta (D) elimestä (kuva 9). Vahvistavan elimen eli P-kertoimen avulla saadaan nopeutettua järjestelmän käyttäytymistä. Vahvistusta kasvattamalla saadaan erosuureen arvoa pienennettyä, mutta samalla järjestelmän värähtelyherkkyyskin kasvaa. Integroivan elimen eli I-kertoimen avulla taas parannetaan järjestelmän tarkkuutta, mutta samalla järjestelmästä tulee hidas, sillä integraali pyrkii korjaamaan erosuureen suuruutta niin kauan, että se on nolla. (Åström & Hägglund 1995,

s. 64–70) D-termiä eli derivoivaa elintä käytetään suljetun järjestelmän stabiiliuden parantamiseen, sillä se ennakoii järjestelmässä olevan virheen suuruuden. (Savolainen 2010) D-termin haittapuolena on, että korkeataajuisille signaaleille se käyttää isoa kerrointa, joka voi aiheuttaa suurta vaihtelevuutta ohjaussignaaliin. Täten esimerkiksi korkeataajuisen mittauskohina voi aiheuttaa järjestelmään heilahtelua. (Åström & Murrey 2008, s. 308)

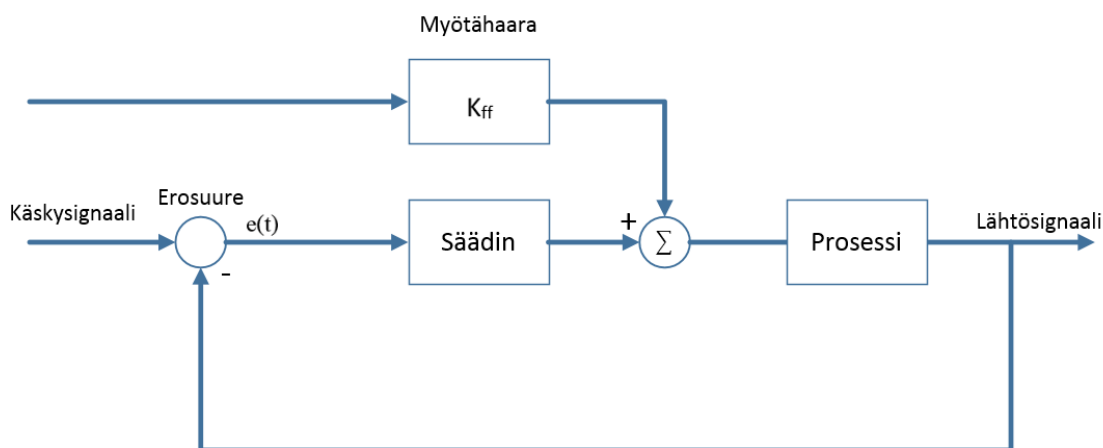


Kuva 9. Servojärjestelmälle toteutetun PID-säädön periaate (mukaillen Stienecker 2011)

PID-säädön yhteydessä käytetään harvoin sen kaikkia termejä, sillä tarpeeksi tarkka säätö saavutetaan usein jo yhden tai kahden termin avulla. Joskus myös jokin termi saattaa aiheuttaa järjestelmään virhettä, jolloin sen termin käyttö jätetään pois. Tällaisia toteutuksia kutsutaan P-, PI- ja PD säätimiksi. (Savolainen 2010) EHVA-järjestelmässä on päädytty käyttämään PID-säätimestä vain P-termiä, sillä I-termi kasvattaa värähtelyä ja D-termi taas aiheuttaa epävarmuutta laskentaan mittauskohinan vaihdellessa. (Herranen 2014, s.64)

3.2.2 Myötäkytkentä

Myötäkytkennällä tarkoitetaan lineaarista säädintä, jota käytetään häiriöiden kompensointiin. Säätimen avulla voidaan parantaa referenssisignaalin vastetta ja vähentää mitattavissa olevien häiriöiden vaikutusta, ennen kuin häiriöt vaikuttavat järjestelmään. (Fleming & Leang 2014, s.251–252) (Åström & Murrey 2008, s.3) Myötäkytkennässä ohjaussignaaliin lisätään arvioitu häiriön vaikutus (kuva 10). Sitä voidaan vielä vahvistaa vahvistuskertoimen K_F avulla, jotta haluttu tarkkuus saavutetaan. (Marlin 1995, s. 514–516)

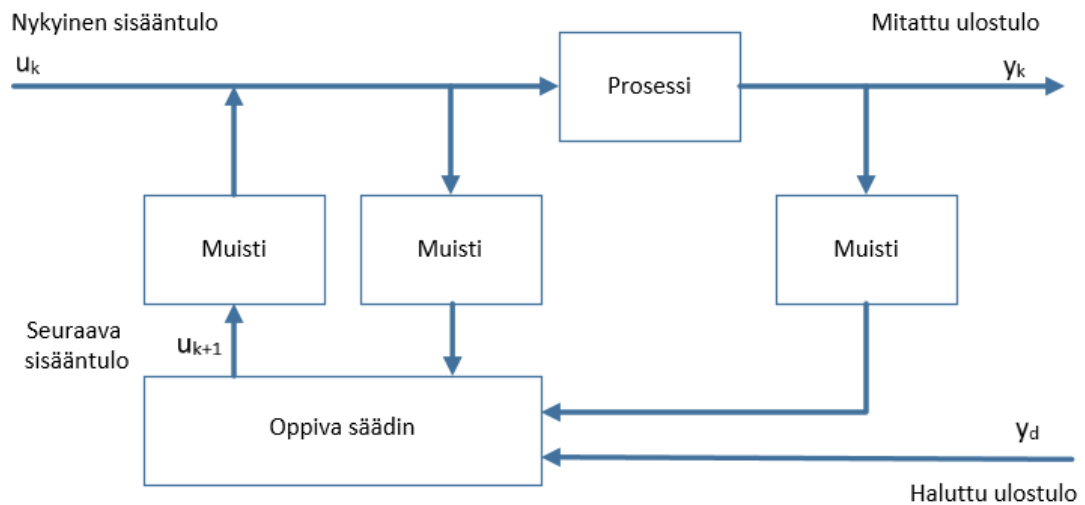


Kuva 10. *Myötäkytkennän periaate servojärjestelmässä (mukaillen Åström & Hägglund 1995, s.285).*

Myötäkytkentä on suunniteltu avoimen piirin toteutuksiin, mutta järjestelmän ominaisuuksien parantamiseksi, voidaan siihen lisätä myös takaisinkytkentä (Fleming & Leang 2014, s.251–252). EHVA-järjestelmässä myötäkytkentää käytetään venttiilin kuormavoiman kompensoimiseen. Joissain monimutkaisissa säätimissä myötäkytkentää käytetään myös säätimen osana. Tällainen säädin on esimerkiksi oppiva säädin (Steinbuch & Molengraft 2000, s.1).

3.2.3 Oppiva säädin

Oppivan säätimen toiminta perustuu järjestelmän toistettavuuteen. Säätimen tarkoituksena on oppia aikaisemmin toteutuneista ohjauksista, riippumatta siitä olivatko ne onnistuneita vai eivät. Sitä käytetään parantamaan järjestelmän vasteaikaa ja ohjaustarkkuutta. Se soveltuu hyvin dynaamisiin ja toistettaviin järjestelmiin. (Chen et al. 2012, s.1648) Kuvassa 11 on havainnollistettu oppivan säätimen toimintaa.



Kuva 11. Oppivan säätimen rakenne (mukaillen Chen et al. 2012, s.1650).

Kuvasta nähdään, että säädin sisältää useita muistilohkoja, joihin se tallentaa tietoa järjestelmän käyttäytymisestä ja niitä hyödyntäen se muodostaa uuden ohjauksen. Oppivan säätimen ohjauslogiikka pohjautuu seuraavaan yhtälöön:

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \gamma \Delta e_k(t), \quad (1)$$

jossa u_k on tämän hetkinen sisääntulo, t on aika, γ on painotettu oppimiskerroin ja Δe_k on seurantavirhe referenssin ja mitatun arvon välillä. Yhtälössä uuteen ohjaukseen lisätään korjaussumma, joka sisältää edellisen kierroksen painotetun seurantavirheen. EHVA-järjestelmässä oppivasäädin tekee korjauksen jokaisessa referenssiprofiilin pisteessä, jolloin yksi venttiilin isku sisältää noin 200 tarkastelupistettä. Säädin muodostaa siis jokaiselle tarkastelupisteelle oman säädön. Kaavassa oleva oppimiskerroin määrittää, kuinka nopeasti päästään haluttuun ohjaustarkkuuteen. Mitä suurempaa oppimiskerrointa käytetään, sitä isompia ja karkeampia korjauksia tehdään. Pienellä oppimiskertoimella haluttuun ohjaustarkkuuteen päästään hitaammin. Sääto on kuitenkin tarkempaa, sillä kerralla tehtävät korjaukset ovat pienempiä. (Chen et al. 2012, s.1648–1651)

Oppivan säätimen avulla voidaan parantaa järjestelmän ohjausta, vaikkei tunneta täysin järjestelmän käyttäytymistä, sillä säädin iteroi joka kierroksella opittujen arvojen pohjalta sopivan ohjauksen. Tämän vuoksi malliin ei tarvitse mallintaa monimutkaisia funktioita, jotka poistaisivat häiriöiden vaikutuksen ja näin ollen oppivan säätimen mallintaminen vaatii pienemmän vaivan. (Chen et al. 2012, s.1648–1649) Säädin pyrkii saamaan seurantavirheen nolaksi tai ainakin mahdollisimman lähelle sitä. EHVA-järjestelmässä venttiilin dynamiikasta johtuen seurantavirhe ei voi olla nolla, minkä vuoksi jossain oppimisen pisteessä seurantavirhe ei enää pienennyy vaan se alkaa kasvaa. Tällöin alkaa säätimen niin sanottu ylioppiminen. (Herranen 2007, s.71) EHVA-mallissa ylioppiminen

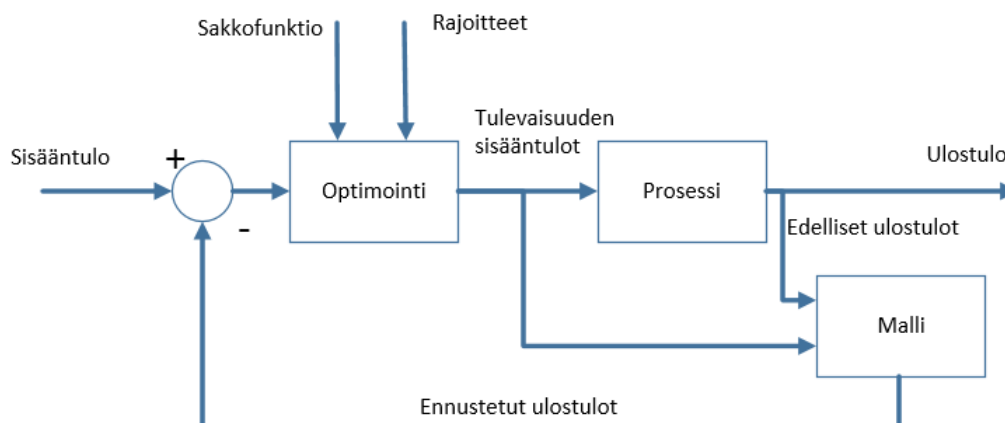
on vältetty asettamalla säätimelle oppimisraajat, jonka saavutettuaan säädin lopettaa oppimisen.

Oppiva säädin on lähtökohtaisesti kehitetty hienosäätämään ohjaustarkkuutta, joten ennen sen käyttöä, järjestelmässä tulisi tehdä karkea säätö muiden säätimien avulla. Oppivan säätimen rinnalla käytetäänkin yleensä P-säädintä. (Herranen 2014, s.70). Jos ohjaustarkkuus säädettäisiin pelkän oppivan säätimen avulla, menisi halutun seurantatarkkuuden saavuttamiseen huomattavasti enemmän aikaa (Wallén 2011, s.39).

3.2.4 Mallipohjainen säädin

Mallipohjainen säädin on ennustava säädin, jota käytetään hyvin erilaisissa järjestelmissä. Kaikilla mallipohjaisilla säätimillä on kolme yhteistä elementtiä, jotka ovat ennustemalli, sakkofunktio ja ohjausfunktion luominen. (Seborg et al. 2011, s.386–387)

Mallipohjainen säädin ei käytä mitään tiettyä ohjausstrategiaa vaan useita eri ohjaustapoja saavuttaakseen sille asetetun tavoitearvon. Sen voidaan ajatella koostuvan kahdesta ohjausosasta, mallista ja optimoinnista (kuva 12). Malli ennustaa prosessin tulevaisuuden ulostulot pohjautuen prosessin edellisiin ulostuloihin ja ennustettuihin sisääntuloihin. Se käyttää analysointiin pääasiassa mittausdataa ja ehdotettuja ohjaustoimintoja. Malliin voidaan myös mallintaa mittaamatonta tietoa prosessin käyttäytymisestä, jota säädin voi käyttää hyväkseen ennustustensa tekemisessä. Optimoinnissa nämä ehdotetut ohjaustoiminnot luodaan sakkofunktion ja rajoitteiden perusteella. Sakkofunktion avulla pyritään minimoimaan järjestelmässä ilmenevien häiriöiden vaikutusta. Mallipohjaisen säädön tarkoituksena on siis löytää optimaalisin tapa päästä asetettuun asetusarvoon. (Camacho & Bordons 2007, s.13)



Kuva 12. Mallipohjaisen säätimen peruseriaate (Seborg et al. 2011, s.387).

Mallipohjaisen säätimen etuna on sen soveltuvuus erilaisiin prosesseihin, kuten esimerkiksi pitkän viiveen omaaviin, epävakaisiin tai monimuuttujajärjestelmiin. Sillä on

myös luonnollinen tapa kompensoida häiriöitä ja kuollutta aikaa. Lisäksi sen ohjauslogiikka on helposti toteutettavissa ja se vie vain vähän laskentatehoa. PID-säätimeen verrattaessa mallipohjainen säädin on kuitenkin monimutkaisempi ja vie enemmän laskentatehoa, varsinkin jos prosessin dynamiikka pysyy vakiona, sillä se pyrkii ennustamaan uuden ohjauksen jokaisella ohjelmakierrolla. Mallipohjaisen säätimen ohjausalgoritmi perustuu usein esitietoon prosessin käyttäytymisestä, eikä oikeaan prosessiin. Tämä voi aiheuttaa poikkeamia todellisen prosessin ja mallin välillä. (Camacho & Bordons 2007, s.1–2)

3.2.5 Muita yleisesti käytössä olevia säätimiä

Sähköhydraulisissa venttiilin ohjausjärjestelmissä käytetään hyvin erilaisia säätimiä, mikä johtuu muun muassa erilaisista järjestelmien toteutustavoista, käyttöolosuhteista ja käyttökohteesta. Tavallisesti säätimien avulla halutaan parantaa kokonaisuudessaan venttiilin seurantatarkkuutta, mutta joskus niitä käytetään myös kompensoimaan yksittäisten häiriöiden vaikutusta. Sähköhydraulista venttiilin ohjausta käsittelevissä julkaisuissa (Sun & Cleary 2003; Liu & Chang 2011) käytetään usein vähintään kahta säädintä, jotta päästään vaatimusten mukaisiin ominaisuuksiin. Käytetyimpiä säätimiä ovat PID-, oppiva, mallipohjainen, adaptiivinen ja liukuvan moodin säätö (Sun & Cleary 2003) (Liu & Chang 2011) (Chao et al. 2016) (Alrefo 2016). Näistä kolmea ensimmäistä säädintä käytetään myös EHVA-järjestelmässä ja niiden toimintaa onkin esitetty aikaisemmissa luvuissa. Seuraavaksi tutustutaan hieman adaptiiviseen säätöön ja liukuvan moodin säätöön.

Adaptiivisessa säädössä optimaalisen suorituskyvyn saamiseksi säätimen parametrit viritetään automaattisesti vastaamaan vallitsevaa toimintatilaa (Edge 1996, s. 98). Sitä käytetään sähköhydraulisessa venttiiliohjauksessa vain venttiilin maksiminoston säätöön. (Liao et al. 2008, s. 975). Liukuvan moodin säädössä järjestelmän tilat pakotetaan epälineaarisen funktion avulla liikkumaan kohti järjestelmälle valittua liukumispintaa (Edwards & Spurgeon 1998). Säädin mahdollistaa vakaan venttiilin maksimiliikkeen ohjauksen, moottorin kierrosnopeuden vaihdellessa, sillä käytetyn kierrosnopeuden on havaittu vaikuttavan venttiilin nostokorkeuteen. Joissain toteutuksissa venttiilin tarkan ohjauksen saamiseksi liukuvan moodin säädöllä ohjataan hydraulipumpun nopeutta. Tämän säätimen merkittävimpänä etuna on sen aiheuttama järjestelmän jäykkyyden kasvaminen. (Pournazeri et al. 2011)

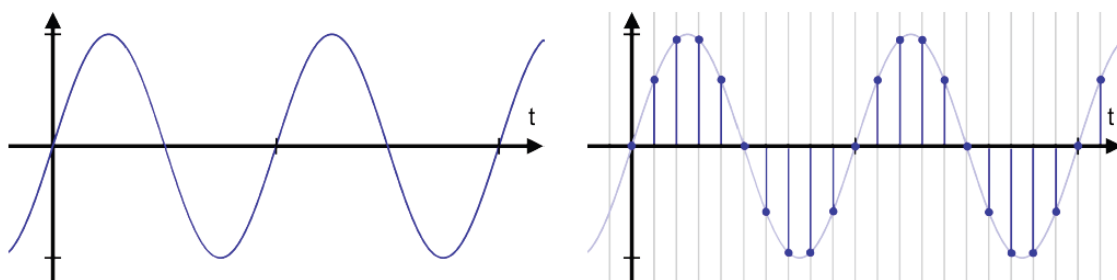
Herranen (2014) on testannut väitöskirjassaan erilaisten säätimien vaikutusta EHVA-järjestelmän seurantatarkkuuteen. Tutkimuksissaan hän vertaili tilasäätöä, P-säädintä, oppivaa säädintä ja mallipohjaista säädintä. Testaustulosten perusteella oppivan säätimen avulla päästiin parhaimpaan seurantatarkkuuteen, mutta se vaatii myös eniten laskentatehoa ja se on rakenteeltaan monimutkaisin. Mallipohjainen säädin ei käytä yhtä

paljon laskentatehoa, kuin oppiva säädin, mutta sillä ei myöskään päästä yhtä hyvään seurantatarkkuuteen. Tilasäädön avulla päästään hyvään seurantatarkkuuteen mutta siinä on paljon säädettäviä parametreja, jonka vuoksi järjestelmää on vaikeaa ja hidasta käyttää. P-säädin on säätimistä yksinkertaisin ja helpoin käyttää mutta sen seurantatarkkuus on huonoin. (Herranen 2014, s.85–89)

3.3 Näytteenottotaajuus

Ohjaustarkkuuteen vaikuttaa merkittävästi ohjauslaitteessa käytetty näytteenottotaajuus. Ohjauslaitteen säätimen toimintanopeuden tulisi olla moninkertainen järjestelmän nopeuteen nähden, joskus jopa 10-kertainen. Tähän pystytään vaikuttamaan valitsemalla ohjauslaitteelle sopiva näytteenottotaajuus. (Fonselius et al. 2006, s.174,184) Tässä luvussa esitellään aluksi mitä näytteenottotaajuudella tarkoitetaan, jonka jälkeen siirrytään tarkastelemaan tapoja, joilla prosessorin kuormitusta voidaan pienentää.

Näytteenottotaajuus kuvaa signaalista otettavien näytteiden määrää sekunnissa. Näytteenottoväli on taas näytteenottotaajuuden käänteisluku ja se kuvaa aikaväliä, jonka välein jatkuva-aikaisen signaalin arvoja tarkastellaan. (Åström & Wittenmark 1997, s.31) Suuri näytteenottotaajuus tarkoittaa siis pientä näytteenottoväliä. Signaalin näytteistämistä on havainnollistettu kuvassa 13. Näytteistämisen jälkeen signaalia kutsutaan diskreettiaikaiseksi signaaliksi digitaalisen signaalin sijaan, sillä se voi saada minkä tahansa arvon jatkuvalta aika väliltä. (Schmidt, s.1)



Kuva 13. Näytteistetty sinisignaali (Schmidt, s.1).

Näytteenottotaajuuden kasvattaminen kasvattaa signaalista otettavien näytteiden määrää tietyllä aikavälillä, joka vaatii myös koneelta suurempaa laskentatehoa. Liian pienen näytteenottotaajuuden käyttäminen taas saattaa vääristää alkuperäistä signaalia. (Åström & Wittenmark 1997, s.66) Nyqvistin teoreeman mukaan järjestelmässä käytetyn näytteenottotaajuuden tulisi olla vähintään kaksi kertaa niin suuri kuin signaalin suurin taajuus, jottei signaalissa tapahdu laskostumista eli vääristymistä (Schmidt, s.2–3). Järjestelmässä kannattaakin usein käyttää mahdollisimman suurta näytteenottotaajuutta

paremman tarkkuuden saamiseksi, jotta pystytään reagoimaan nopeasti muutoksiin. (Sun & Cleary 2003, s. 3120)

Järjestelmään valittu näytteenottoväli vaikuttaa prosessorin kuormitukseen, jonka vuoksi sopivan näytteenottovälin valintaan tulee kiinnittää huomiota. Prosessorin ylikuormittaminen tarkoittaa tilaa, jolloin ohjauslaitteella ei ole tarpeeksi aikaa suorittaa vaadittuja laskentoja ennen seuraavaan vaiheeseen siirtymistä. (Åström & Wittenmark 1997, s.287) Se miten ohjelmisto reagoi ylikuormitustilanteeseen riippuu ohjelmiston toteutustavasta. Simulink Real-time yhteydessä käyttäjä voi valita mitä tehdään ylikuormitustilanteessa. Usein toimintojen suoritus kuitenkin halutaan keskeyttää. Prosessorin ylikuormittumisen välttämiseksi on kehitetty tapoja, joilla prosessorin kuormitusta pystytään pienentämään. Pieniä kuormituksen muutoksia voidaan tehdä käyttämällä järjestelmässä eri näytteenottovälejä tai jakamalla laskentaa ohjauslaitteen eri ytimille. (Mathworks 2017) (Bhat 2015) Eri näytteenottovälejä käytettäessä voidaan esimerkiksi mittausdatan käsittelemiseen käyttää pienempää näytteenottoväliä, kuin halutun ulostulon toteuttamiseen (Ren & Zhu 2010, s.664). Jakamalla toiminnallisuuksia eri ytimille voidaan mallin sisällä olevia toimintoja suorittaa rinnakkain moniytimisellä ohjauslaitteella. Tällä tavalla voidaan pienentää siis yksittäisen ytimen kuormitusta. On kuitenkin huomattava, että kahden ytimen käyttö ei automaattisesti tarkoita 50 %:n suorituskyvyn parannusta, sillä siihen vaikuttavat käytetyn mallin rakenne sekä tapa, miten mallin toiminnot on jaoteltu ytimien välillä. (Bhat 2015) Mikäli kuormitusta on tarvetta pienentää huomattavasti, tulee järjestelmässä harkita vaihtoehtoisten mikropiirin käyttämistä. Niiden avulla voidaan suorittaa osa tai koko mallin laskenta tavallisen prosessorin sijaan. Tässä työssä keskitytään vain FPGA:n mahdollisuuksiin, sillä ohjausyksikkö sisältää itsessään FPGA-tuen.

FPGA on digitaalinen mikropiiri, joka pystyy suorittamaan laskentaa nopeammin kuin tavallinen prosessori, sillä siinä laskenta on toteutettu rinnakkaisesti. Tavallisella prosessorilla laskenta on toteutettu peräkkäisesti ennalta määritellyssä järjestyksessä, jolloin käskyt suoritetaan yksi kerrallaan. Tämän vuoksi suurin osa prosessorin ajasta menee ajoittain saapuvien tehtävien odottelemiseen toisin kuin FPGA:lla. Rinnakkaisen laskennan haittapuolena on sen tuomat haasteet ohjelmoijille, sillä välilaskenta tulee ajoittaa samanaikaiseksi. (Wilhelmsson et al. 2006) FPGA ei ole yhtä monipuolinen kuin tavallinen prosessori, sillä sen sisäinen rakenne suunnitellaan aina tiettyyn tehtävään sopivaksi. Tästä johtuen sovelluskohteen muuttaminen tarkoittaa FPGA toteutuksessa koko laitteiston sisäisen rakenteen uudelleen suunnittelua. Tämä on erittäin työläs tehtävä verrattaessa sitä tavalliseen prosessoriin, jolloin ohjelmoitaisiin vain prosessori uudelleen uuteen käyttökohteeseen soveltuvaksi. (Wilhelmsson et al. 2006) FPGA soveltuikin parhaiten esimerkiksi sulautettuihin järjestelmiin, jossa niitä käytetään mittausdatan käsittelyyn. FPGA tekniikkaa käytetään laajalti eri tekniikan aloilla ja sen käyttökohteet laajenevat koko ajan. (Dubey 2008, s.1, 103)

4. IMPLEMENTAATIOMALLIN TOTEUTUS

Luvun alussa tarkastellaan uudelta implementaatiomallilta vaadittuja ominaisuuksia. Tämän jälkeen esitellään tapoja, joiden avulla vaatimuksiin päästään. Erityisesti luvussa esitellään uuteen implementaatiomalliin tehtyjä suurimpia muutoksia. Tämän työn myötä EHVA-järjestelmän ohjausmallista halutaan tehdä uusi yksinkertaisempi implementaatio, joka soveltuu paremmin uudelle ohjausyksikölle. Tarkoituksena on poistaa turha ajan saatossa malliin jäänyt käyttämätön logiikka muuttamatta mallin toiminnallisuuksia. EHVA-mallin haluttiin olevan mallinnustyylistään yhtenäinen muiden moottorin ohjausmallien kanssa, jotta eri sovellukset toimisivat hyvin keskenään. Lisäksi järjestelmän ohjaustarkkuuden haluttiin olevan vähintään yhtä hyvä, kuin aikaisemmassa toteutuksessa. Yhtenä tavoitteena oli myös pienentää mallin vaatimaa laskentatehoa.

Uuden implementaation tekeminen aloitettiin puhtaalta pöydältä, sillä mallin rakenne haluttiin uudistaa kokonaan ja näin myös varmistuttaisiin, että ylimääräinen laskenta jäisi pois mallista. Mallin rakenteen haluttiin pohjautuvan hitaisiin ja nopeisiin ohjauksiin, jotta niiden avulla voitaisiin tarvittaessa optimoida mallin vaatimaa laskentatehoa. Hitaille ja nopeille ohjauksille voitaisiin käyttää eri näytteenottovälejä tai sitten nopeat ohjaukset voitaisiin tulevaisuudessa siirtää FPGA:lle. Nopeiksi ohjauksiksi määriteltiin kaikki ohjaukset, jotka vaikuttavat venttiilin ohjaustarkkuuteen, kuten esimerkiksi venttiiliprofiilin luonti ja järjestelmän säätimet. Hitaiksi ohjauksiksi taas määriteltiin osa turvallisuuslogiikasta ja referenssiprofiilien valinta. Näiden pohjalta malli jaettiin neljään kokonaisuuteen: asetusarvojen määrittämiseen, mittausdatan käsittelyyn, turvallisuuslogiikkaan ja venttiilin ohjaukseen. Jotta mallista saataisiin yhtenäinen muiden moottorin ohjausmallien kanssa, se toteutettiin samanlaista mallinnustapaa käyttäen.

Aikaisemmassa toteutuksessa mallin parametrit määriteltiin kolmessa eri tiedostossa, jonka lisäksi osa parametreista oli vielä määritelty Simulinkin ”maskissa”, jotta niitä voitaisiin erillisen käyttöliittymän avulla muuttaa testauksen aikana. Uudessa implementaatiossa kaikki mallin parametrit haluttiin määritellä yhdessä tiedostossa. Vanhassa mallissa viestit eri lohkojen välillä olivat osittain toteutettu simulinkin ”Go to” ja ”From” -lohkojen avulla. Nämä kuitenkin haluttiin poistaa mallista ja käyttää lohkojen yhdistämiseen ainaostaan viivoja. Mallin laskennan diskreetointi oli tehty simulinkissa olevan ”solverin” avulla, jolloin mallissa käytettiin jatkuva-aikaisia lohkoja. Uuden implementaation myötä jatkuva-aikaiset lohkot korvattiin diskreettiaikaisilla, sillä diskreetointia ei haluttu enää tehdä ”solverin” avulla. Lisäksi mallissa osa logiikasta oli toteutettu ”Matlab-function”-lohkojen avulla. Nämä kuitenkin haluttiin poistaa mallista ja sama logiikka haluttiin toteuttaa yksittäisten simulinkin lohkojen avulla. Oppivan

säätimen logiikka on toteutettu kyseisellä tavalla. Mallin toiminnallisuuden ymmärtäminen oli myös haastavaa uusille käyttäjille, sillä sitä ei oltu kommentoitu. Tämän työn myötä malliin on lisätty sen toiminnallisuudesta kertovia kommentteja, jotta tulevien kehittäjien on helpompi ymmärtää, mitä milläkin loholla tehdään. Mallissa ohjaustarkkuuden parantaminen ja laskentatehon pienentäminen pyrittiin toteuttamaan ohjausta yksinkertaistamalla ja parantamalla jo olemassa olevaa logiikkaa. Mallin ohjaustarkkuuden analysoimiseksi tulevissa testeissä siihen haluttiin lisätä muuttuja, joka kuvastaa toimilaitteen ja ieksen välissä olevan välyksen suuruutta. Tämä toteutettiin lisäämällä venttiilin asemaan kalibroinnin yhteydessä välyksen suuruus, jolloin venttiin aseman nolla kohta siirtyy arvioidun välyksen verran.

5. TESTAUSJÄRJESTELMÄN ESITTELY

Tämän työn myötä tehdyn implementaatiomallin toimivuutta halutaan testata, jotta voidaan olla varmoja, että malli toimii halutulla tavalla. Tämän luvun tarkoituksena on määritellä testattavat ominaisuudet, jonka jälkeen valitaan tarkoitukseen sopiva testausmenetelmä. Luvun lopussa esitellään vielä tarkemmin testausprosessia ja valittua testausjärjestelmää.

5.1 Testien päämäärä ja vaihtoehtoiset testausmenetelmät

Uuden ohjausyksikön myötä EHVA ja osa moottorin ohjaussovelluksista tullaan ohjaamaan yhden päämallin kautta. Tämän työn myötä testataan vain EHVA-mallin toimivuutta moottorin päämallin ympäristössä, sillä kaikki moottorin ohjaussovellukset eivät olleet vielä valmiita, kun testaukset aloitettiin. EHVA-mallin toimivuutta muiden moottorimallien kanssa tullaan kuitenkin testaamaan myöhemmässä toimivuuden iteroituvaiheessa. Kun malli toimii täysin, se voidaan ottaa käyttöön testimoottorilla. Ennen EHVA-mallin käyttöönottoa moottorilla sen toiminnallisuus pitää testata huolellisesti, jotta voidaan olla varmoja, ettei ohjelmointivikoja ilmene. Toiminnallisuuden testaamisen lisäksi mallilta halutaan testata ohjaustarkkuuteen vaikuttavia asioita. Tämän myötä ohjausmallille halutaan määrittää sopiva näytteenottoväli sekä selvittää, kuinka paljon valitulla näytteenottovälillä kuormitetaan tavallista prosessoria. Näiden ominaisuuksien selvittämiseksi mallin toimivuutta voidaan testata prosessimallin avulla, testirigillä tai oikealla moottorilla. Seuraavaksi esitellään tarkemmin testaustapojen soveltuvuutta mallin testaamiseen.

Prosessimalli tarkoittaa järjestelmän dynaamista käyttäytymistä kuvaavaa mallia, jonka avulla voidaan testata ohjausmallin toimivuutta. Prosessimalliin viedään ohjausmallissa muodostettu ohjaussignaali, jonka perusteella prosessimalli muodostaa järjestelmän käyttäytymistä vastaavan sisääntulosignaalin ohjaukselle. Järjestelmän todellista dynaamista käyttäytymistä vastaavan mallin tekeminen on kuitenkin haastavaa. Jos dynaaminen malli ei kuvaa täysin järjestelmän käyttäytymistä, eivät testaustuloksetkaan ole kovin luotettavia. Prosessimallin testeissä ei kuitenkaan tarvita erillistä testauslaitteistoa ja testaaminenkin on helppoa. Jotta mallin toimivuutta pystytään tarkastelemaan tarkemmin, olisi testeissä hyvä käyttää real-time PC:tä. Toinen vaihtoehto on testata mallin toimivuutta testirigillä, jolloin nähdään järjestelmän toiminta konkreettisesti. Testeissä voidaan käyttää yksisylinteristä testirigiä W20 moottorin sylinterinkannella, vaikka implementaatiomalli on tehty kuusi sylinteriselle moottorille, sillä venttiilien ohjausmallit ovat identtiset keskenään. Rigitestien etuna on, ettei järjestelmä mene helposti rikki ohjelmistovikojen vuoksi, sillä siinä ei ole palotilassa

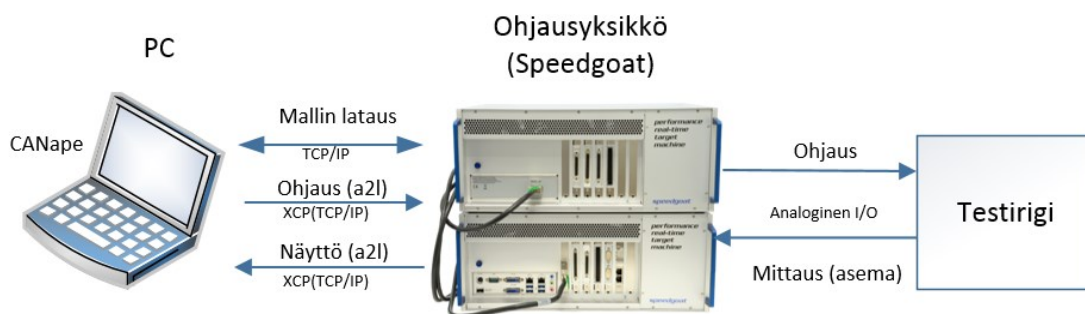
liikkuvaa mäntää. Näiden testien huonona puolena on, että testirigi on kasattava ja siihen on tehtävä tarvittavat sähkökytkennät. Sen lisäksi ohjausyksikön käyttöaika on rajallinen, sillä sitä tarvitaan myös muissa projekteissa. Kolmantena vaihtoehtona on testata ohjausmallia oikealla moottorilla. Moottorilla tehtävissä testeissä olosuhteet olisivat lähimpänä todellista tilannetta, jolloin saataisiin kaikkein luotettavinta tietoa järjestelmän toimivuudesta. Oikealla moottorilla tehtävät testit ovat kuitenkin haastavampia toteuttaa, sillä mahdolliset testausajat jäisivät hyvin lyhyiksi ja katkonaisiksi, eikä kaikkia haluttuja testejä välttämättä ehdittäisi tehdä.

Edellä esitettyjen testaustapojen pohjalta päädyttiin testaamaan mallin toimivuutta prosessimallin ja testirigin avulla. Prosessimalli testejä varten tullaan työssä tekemään prosessimalli, joka kuvaa venttiilin liikettä. Prosessimallin avulla on tarkoitus testata mallin toimivuus. Mallin toimivuudet tulee olla niin hyvin testattu, ettei rigitesteissä enää tarvitse tehdä suuria korjauksia itse malliin. Rigitestien päätarkoituksena on tutkia järjestelmän käyttäytymistä ja selvittää optimaalinen näyteenottoväli ilman prosessorin turhaa kuormittamista. Rigitestit eivät vastaa aivan todellista moottorin olosuhteita, mutta niiden avulla saadaan kuitenkin melko luotettavaa tietoa järjestelmän käyttäytymisestä.

5.2 Testauslaitteiston esittely

Ohjausmallin testaus aloitetaan prosessimallin avulla. Sitä varten malliin mallinnettiin ideaalinen prosessimalli, jossa käytetään diskreettiaikaista integraattoria venttiilin liikkeen kuvaamiseen. Prosessimalli on diskreettiaikainen, jotta sen käyttäminen olisi mahdollista myös reaaliaikapohjaisella tietokoneella. Prosessimallin avulla ei ollut tarkoitus tarkastella järjestelmän ominaisuuksia, vaan ainoastaan toimia apuvälineenä mallin toimivuuden testauksessa, jonka vuoksi siinä voidaan käyttää ideaalista mallia. Yksinkertaisen prosessimallin tekeminen on myös paljon helpompaa. Jotta kuitenkin voidaan varmistua, että malli toimii myös häiriöitä sisältävässä järjestelmässä, tulee sitä testata vielä testi rigillä.

Rigitestit suoritetaan Wärtsilän Vaskiluodon laboratoriossa sijaitsevassa testisolussa. Testauslaitteiston voidaan sanoa koostuvan karkeasti kolmesta kokonaisuudesta, jotka ovat tietokone (sisältää käyttöliittymän), ohjausyksikkö ja itse testilaitteisto (kuva 14). Käyttöliittymänä käytetään Vectorin kehittämään CANapea. Se kommunikoi ohjausmallin sisältävän ohjausyksikön kanssa. Ohjausyksikkönä taas käytetään Speedgoattia.



Kuva 14. Testilaitteisto ja sen kokonaisuudet (Speedgoat 2017).

Ennen testejä Simulink-malliin tulee määritellä CANapen avulla tarkasteltavat parametrit ja datavirrat. Sen jälkeen malli käännetään C-koodiksi ja linkitetään ohjausjärjestelmän ymmärtämään ja alasladatavaan binäärimuotoon. Tässä yhteydessä muodostetaan vielä a2l-tiedosto, joka sisältää listan mallin parametreista, signaaleista sekä niiden muistiosoitteista. Käännöksen jälkeen nämä ladataan ohjausyksikölle, jonka jälkeen mallin testaaminen voidaan aloittaa. CANapen avulla voidaan ohjata ja tarkastella a2l-tiedostossa määriteltyjä parametreja ja signaaleja. Speedgoat on yhteydessä testirigiin analogiakorttien välityksellä, jonka avulla tuodaan malliin mitattu venttiilin asema. Speedgoat tukee jänniteviestiä $\pm 10V$, joten anturilta tuleva virtaviesti tulee muuntaa vastusten avulla jänniteviestiksi. Testirigille menevä jänniteviesti on skaalattu Simulink-mallissa virtaviestiksi (4–20mA), joten sitä ei tarvitse käsitellä vastusten avulla.

Kuvassa 15 on valokuva testirigistä. Kuvassa järjestelmän takana sijaitsee hydraulikoneikko, joka koostuu öljysäiliöstä, hydraulipumpusta ja 3-vaihe sähkömoottorista. W20 moottorin sylinterin kansi on asetettu oranssin tukirakenteen päälle. Esiohjausventtiili sijaitsee sylinterin kannen vasemmalla puolella ja se liikuttaa kaasunvaihtventtiileitä, jotka sijaitsevat sylinterin kannen sisällä. Asema-anturi sijaitsee keskellä sylinterin kantta, kaasunvaihtventtiileiden yläpuolella.



Kuva 15. *EHVA-järjestelmän testirigi.*

Järjestelmän ohjauksessa käytetään virtuaalista moottorin nopeutta ja kammenkulmaa, sillä rigi koostuu vain sylinterin kannesta ja siinä olevista komponenteista, eikä siinä ole kampiakselia tai vauhtipyörää. Seuraavassa luvussa esitellään edellä esitellyn laitteiston avulla saatuja testaustuloksia.

6. JÄRJESTELMÄN TESTAUS JA ANALYSOINTI

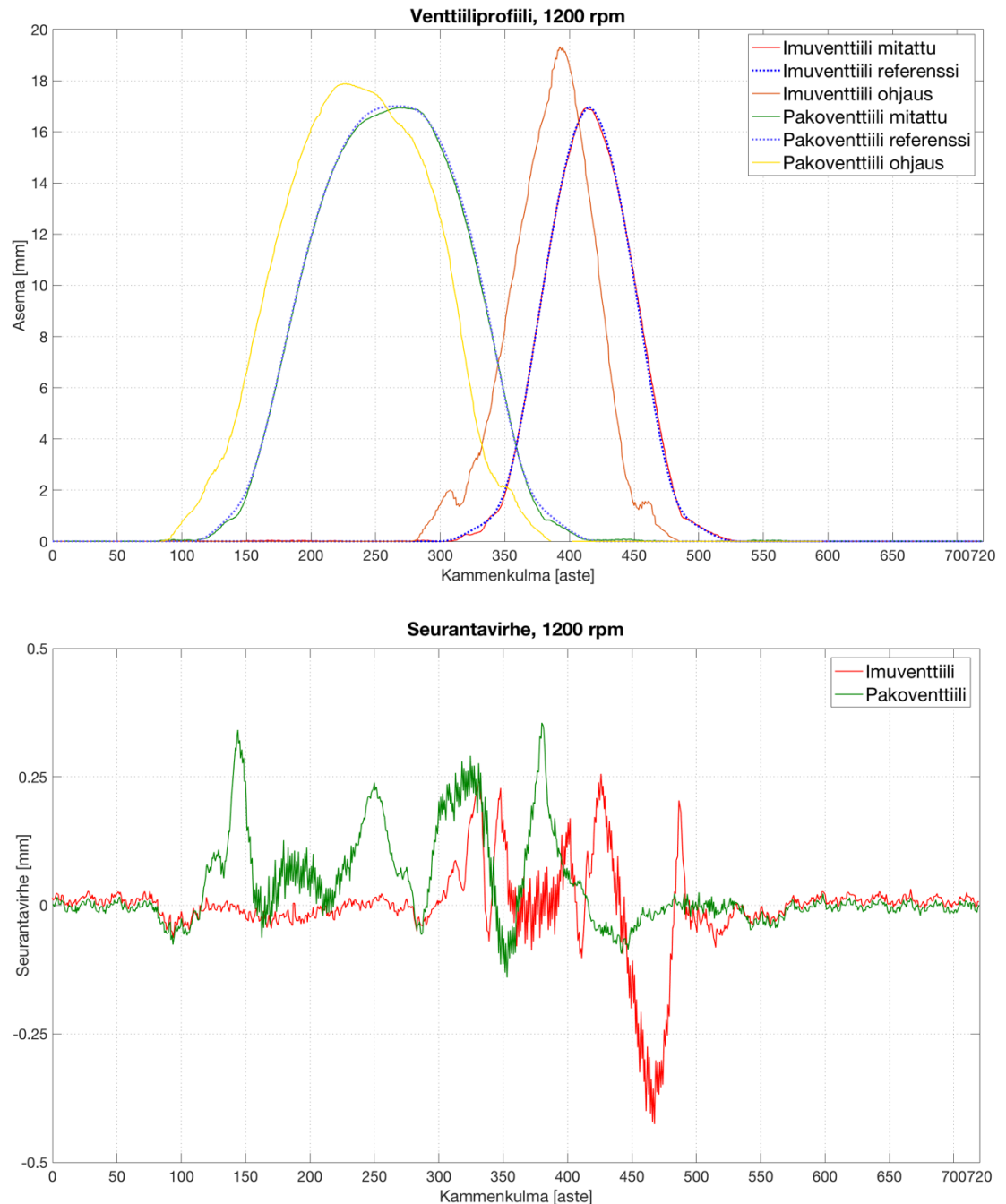
Tässä luvussa esitellään rigitesteistä saatuja tuloksia ja analysoidaan järjestelmän käyttäytymistä tulosten pohjalta. Testien tärkeimpänä osuutena oli valita sopiva näytteenottoväli EHVA-mallille, jotta päästään haluttuun ohjaustarkkuuteen ja optimaaliseen prosessorin kuormitukseen. Luku aloitetaan järjestelmän ominaisuuksien tarkastelulla, jonka jälkeen valitaan järjestelmälle sopiva näytteenottoväli testaustulosten perusteella.

6.1 Järjestelmän ominaisuuksien tarkastelu

Järjestelmän ohjaustarkkuuteen vaikuttavat esiohjausventtiilin viive ja järjestelmässä ilmenevät häiriöt. Niiden vaikutusta on pyritty pienentämään pääasiassa P-säätimen, viivekompensoinnin ja oppivan säätimen avulla. P-säätimen avulla poistetaan ohjauksessa oleva karkea virhe, jonka jälkeen viivekompensoinnilla säädetään viiveensuuruus alle yhden kammenkulma-asteen suuruiseksi. Lopuksi vielä hienosäädetään ohjaus oppivan säätimen avulla. Edellä esitetyistä säätimistä P-säätimen ja oppivan säätimen avulla säädetään ohjaustarkkuutta y-akselin suuntaisesti, kun taas viivesäätimellä säätö tapahtuu x-akselin suuntaisesti. Venttiiliprofiili voidaan esittää ajan tai kammenkulman funktiona. Yleensä sitä kuitenkin tarkastellaan kammenkulmissa, sillä se kuvaa paremmin toistuvaa prosessia. Siinä jokaisen venttiilin iskun oletetaan tapahtuvan samassa kammenkulmassa mahdollisimman pienillä eroavaisuuksilla.

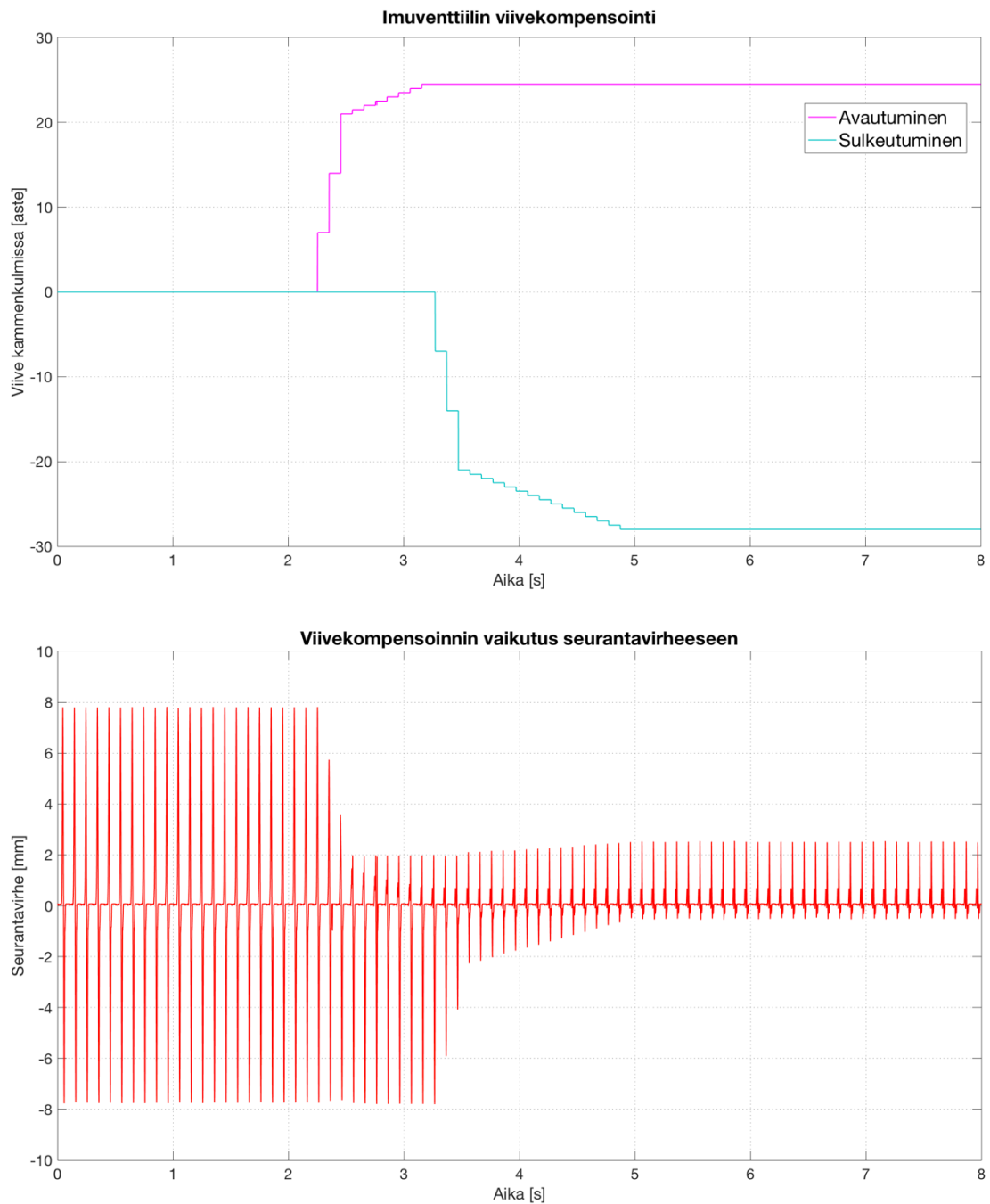
Tässä luvussa esiteltyt testaustulokset pohjautuvat 1200 rpm virtuaaliseen kierrosnopeuteen ja 0,1 ms näytteenottoväliin. Kuvassa 16, venttiiliprofiili on esitetty kammenkulmissa, jonka vuoksi vasemmanpuoleisessa profiilissa on kuvattu pakoventtiilin ohjausta ja oikean puoleisessa profiilissa imuventtiilin ohjausta. Mitattua imuventtiilin liikettä kuvataan punaisella ja pakoventtiilin liikettä vihreällä värillä. Referenssiprofiileja taas imu- ja pakoventtiilille on merkattu eri sävyisillä sinisillä. Imu- ja pakoventtiileiden profiilit ovat erilaiset, sillä niissä on käytetty erilaisia referenssiprofiileja. Imuventtiilin referenssiprofiili on muun muassa kapeampi, sillä siinä on huomioitu Miller-ajoitus. Erilaisilla referenssiprofiileilla vaikutetaan myös venttiilin ohjaustarkkuuteen. Venttiilin hitaudesta johtuen seurantavirhe kasvaa, mikäli ohjauksessa tehdään liian nopeita muutoksia. Näin käy, jos venttiiliä esimerkiksi yritetään sulkea liian nopeasti avautumisen jälkeen. Testeissä P-säätimen vahvistuskerroin imuventtiilille on 670, kun taas pakoventtiilille se on 800. Kuvan 16 testeissä P-säätimen lisäksi käytössä on viivesäädin ja oppiva säädin. Viiveen kompensoinnin vaikutus nähdään ohjausprofiilista, jota on kuvattu pakopuolella keltaisella ja imuventtiilin puolella oranssilla värillä. Molemmissa profiileissa venttiilin ohjausta on aikaistettu.

Oppivan säätimen vaikutuksesta ohjausprofiili muuttuu muhkuraisemmaksi, sillä niissä kohdissa säädin on kasvattanut tai pienentänyt venttiilin ohjausarvoa, jotta venttiili seuraisi mahdollisimman hyvin asetettua referenssiprofiilia. Suurimmat korjauskohdat ovat venttiilin avautuessa ja sulkeutuessa sekä venttiilin ollessa täysin auki. Nämä johtuvat osaltaan venttiilissä käytetyistä jousista ja venttiilin dynamiikasta. Valmistajan antamista esiohjausventtiilin teknisistä tiedoista huomattiin venttiilin ohjauksen olevan epälineaarinen venttiilin ohjauksen alussa ja lopussa.



Kuva 16. Venttiilin ohjaustarkkuus kierrosnopeuden ollessa 1200 rpm ja näytteenottovälin ollessa 0,1 ms.

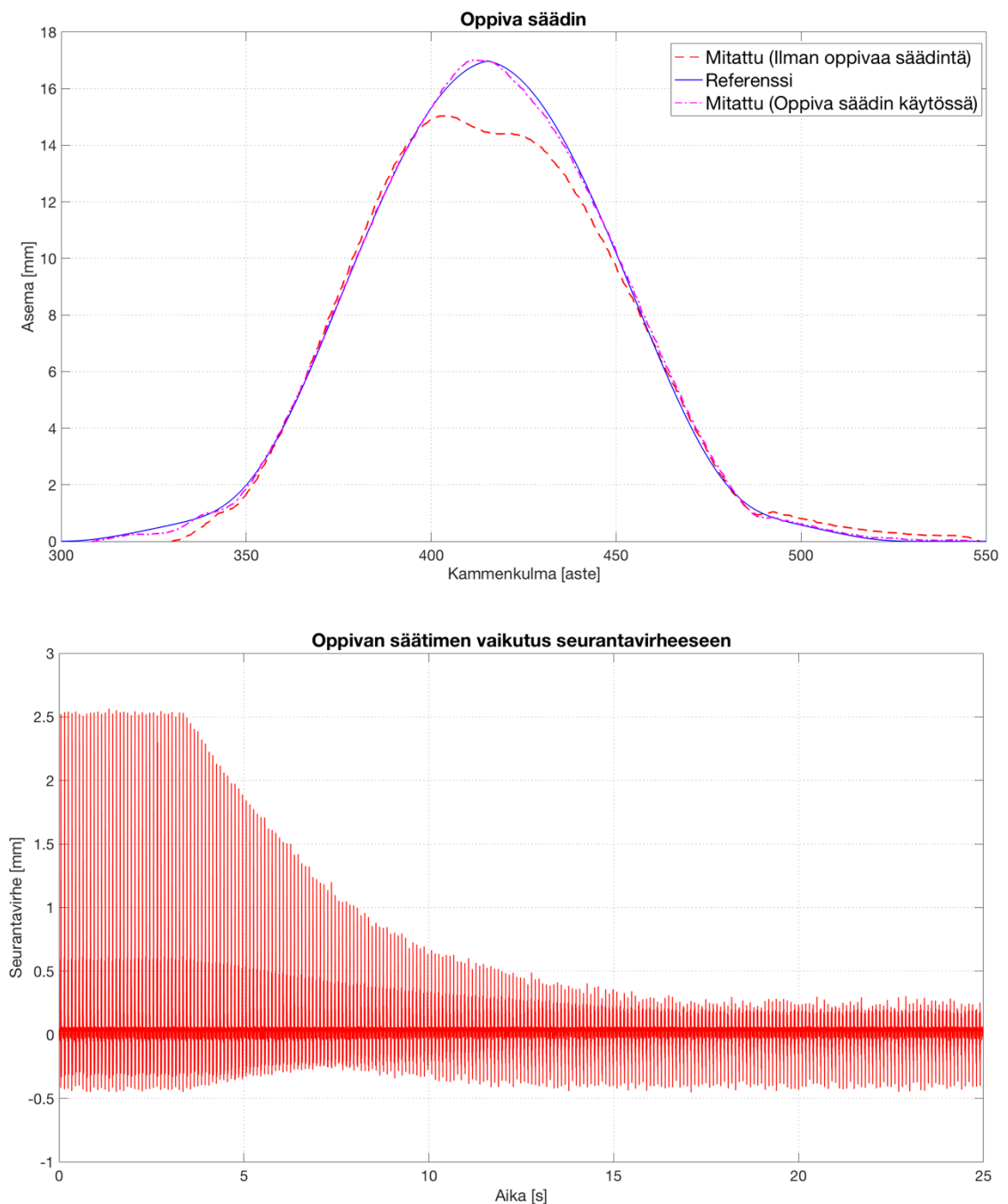
Seurantavirheen suuruutta imuventtiilille on merkattu punaisella värillä ja pakoventtiilille vihreällä värillä. Venttiiliprofiilia ja seurantavirheen suuruutta vertaillen nähdään seurantatarkkuuden olevan hyvä, sillä molemmilla profiileilla päästään alle 0,5 mm seurantatarkkuuteen. Imu- ja pakoventtiilin maksimivirheet tapahtuvat venttiilin sulkeutuessa. Seuraavaksi tarkastellaan yksittäisten säätimien vaikutusta ohjaustarkkuuteen. Kuvassa 17 tarkastelun kohteeksi otetaan P-säädin ja viivesäädin.



Kuva 17. Viivekompensoinnin toiminta. Kuvassa venttiilin avautumisviiveen kompensointi aloitetaan ajan hetkellä 2,3 s ja sulkeutumisviiveen 3,3 s.

Kuvassa venttiilin ohjauksen säätö aloitetaan P-säätimellä. Sen avulla seurantavirheen suuruus on noin 8 mm käytetyllä testausjärjestelmällä. Säätimen avulla päästään todellisuudessa paljon parempaan ohjaustarkkuuteen, mutta P-säätimen liian kireää viritystä pyritään välttämään, sillä se tekee ohjauksesta epästabiilin ja kuluttaa venttiilin osia. Pelkällä P-säätimellä ei kuitenkaan päästä niin hyvään seurantatarkkuuteen mitä sen ja oppivan säätimen yhteisvaikutuksella. Viivesäädin laitetaan päälle ajan hetkellä 2,3 s. Säädin aloittaa viiveen kompensoinnin ensin venttiilin avautumisesta (violetti käyrä), jonka jälkeen se kompensoi venttiilin sulkeutumisviiveen (sininen käyrä). Viiveen ollessa suuri säädin toteuttaa kompensoinnin isoilla askelilla, kun taas pienemmillä viiveillä kompensointi askeleet ovat pienempiä. Tämä voidaan nähdä myös kuvan 17 ylemmästä kuvaajasta. Viivekompensointi kesti näillä asetuksilla 2,5 sekuntia ja sen avulla seurantavirhe on lopuksi enää 2,7 mm. Kuvassa on havainnollistettu imuventtiilin viivekompensointia mutta toiminnallisuudeltaan se ei eroa pakoventtiilin viivekompensoinnista. Viiveenkompensointi alkaa värähdellä, jos venttiilin ohjauksen toistettavuus on huono, sillä säädin yrittää korjata viivettä niin pitkään, että viive on tarpeeksi pieni. Tämä voidaan välttää siirtämällä viivesäätimen aseman vertailupistettä kauemmas avautumis- ja sulkeutumispaikasta, sillä yleensä toistettavuus huononee näissä kohdissa.

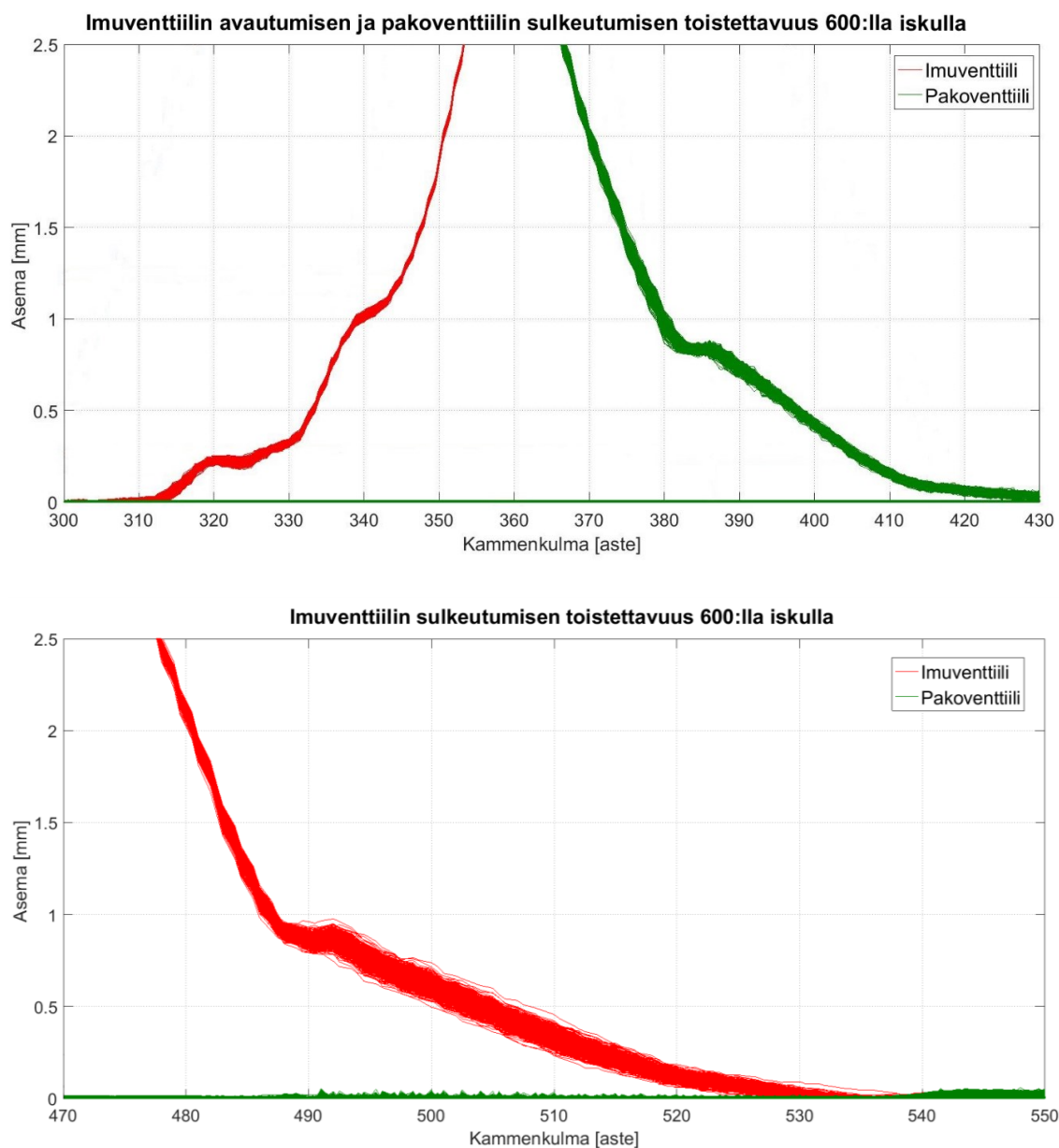
Oppivan säätimen vaikutusta ohjaustarkkuuteen on esitetty kuvassa 18. Kuvan testeissä parametrien arvot ovat samat, kuin aikaisemmissa testeissä. Tarkastelun kohteeksi, kuitenkin valittiin vain imuventtiili. Kuvassa referenssiprofiilia kuvataan sinisellä käyrällä ja venttiilin asemaprofiilia (ennen oppimista) punaisella käyrällä. Violetti käyrä taas kuvaa opittua venttiiliprofiilia, kun oppiva säädin on säätänyt venttiiliohjauksen mahdollisimman tarkaksi. Kuvasta huomataan, että oppivan säätimen avulla saadaan seurantavirhettä pienennettyä merkittävästi ja maksimivirheeksi saavutetaan jo kuvassa 16 esitetty 0,43 mm. Ylioppimisen välttämiseksi, oppivalle säätimelle on asetettu oppimisrajat. Ilman oppimisrajoja voitaisiin oppivan säätimen avulla päästä hetkellisesti vielä parempaan seurantatarkkuuteen. Näissä testeissä oppivan säätimen minimi oppimisrajaksi on asetettu 0,09 mm keskiarvovirhe. Oppiva säädin on hidas säädin, mikä havaitaan myös kuvasta, sillä säätimellä kestää näillä asetuksilla 12,9 sekuntia päästää haluttuun seurantatarkkuuteen. Säätimen nopeuteen, kuitenkin vaikuttaa seurantavirheen suuruus ennen oppimista ja se kuinka suurta oppimiskerrointia käytetään.



Kuva 18. *Oppivan säätimen toiminta.*

Venttiilin ohjauksen toistettavuus on erittäin tärkeä ominaisuus, sillä se vaikuttaa venttiilin ohjaustarkkuuden luotettavuuteen. Toistettavuuden ollessa huono ei venttiilin ohjaustarkkuutta pystytä parantamaan pelkkien parametrimuutosten avulla. Venttiilin ohjaustarkkuuden toistettavuutta on esitetty kuvassa 19. Testeissä kaikki järjestelmän säätimet ovat käytössä ja lähtöarvot ovat samat, kuin aikaisemmissa testeissä. Nyt tarkastelu kuitenkin kohdistuu yhden venttiilin iskun sijaan 600:n iskuun. Näillä asetuksilla huomataan, että kaikkein huonoin toistettavuus on venttiilin avautuessa, sulkeutuessa sekä venttiilin ollessa täysin auki. Moottorin ominaisuuksien kannalta

kaikkein kriittisimmät kohdat, joissa venttiilin ohjauksen toistettavuuden tulisi olla mahdollisimman hyvä, ovat pakovernttiilin sulkeutumiskohta ja imuventtiilin avautumisekä sulkeutumiskohdat. Tästä johtuen näihin keskitytään työssä tarkemmin. Imuventtiilin toistettavuutta on merkattu kuvassa punaisella ja pakovernttiiliä vihreällä värillä.



Kuva 19. Venttiiliohjauksen toistettavuus.

Kuvasta nähdään, että toistettavuus on huonoin käyrän paksuimmissa kohdissa. Tässä tapauksessa se tarkoittaa imuventtiilin sulkeutumista ja kohtia venttiiliprofiilissa, joissa venttiilin asemassa on havaittavissa nytkähdyksiä. Pakovernttiilin sulkeutumisessa ja imuventtiilin avautumisessa toistettavuus on huonoimmillaan 0,2 mm ja 2,6 astetta. Imuventtiilin sulkeutuessa aseman toistettavuus on samaa luokkaa, mutta

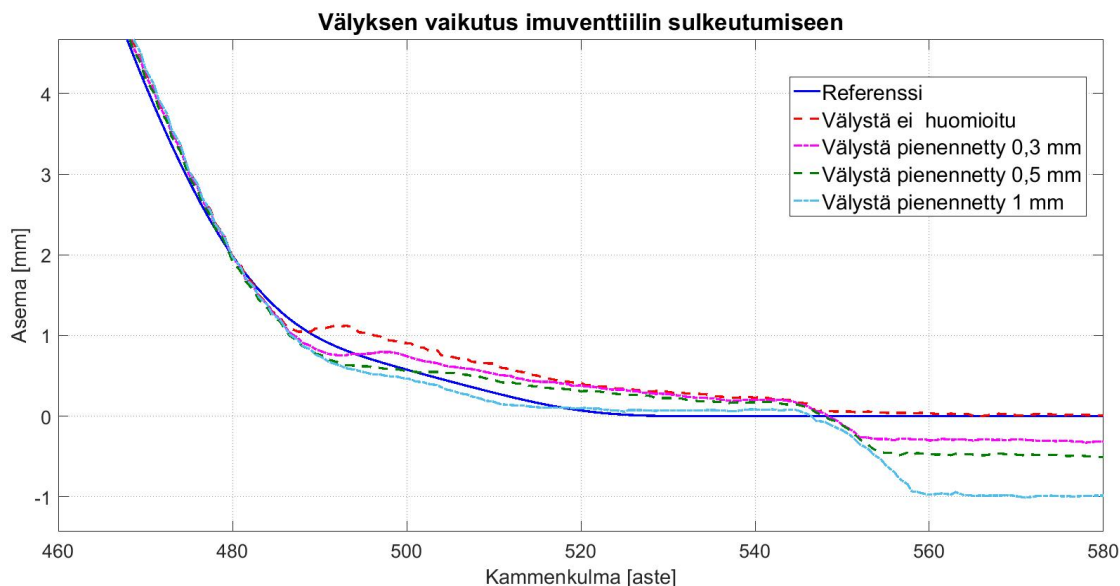
kammenkulmissa se on jopa 7 astetta. Se ylittää alussa määritellyn 3 asteen toistettavuusrajan. Maksimi ylitys ei kuitenkaan heikennä ohjaustarkkuutta, sillä se tapahtuu venttiilin aseman ollessa alle 1 mm kohdassa. Tässä kohdassa voidaan sanoa venttiilin olevan jo kiinni, sillä anturilla mitataan todellisuudessa toimilaitteen karan asemaa, eikä todellista venttiilin asemaa.

Venttiilin todellinen avautuminen ja sulkeutuminen oletetaan tapahtuvan venttiilin ollessa 2 mm kohdassa. Tästä johtuen kyseinen piste on kiinnostava toistettavuuden kannalta. Kuvasta nähdään, että ohjauksen toistettavuus on näissä pisteissä hyvä. Molemmilla venttiileillä päästään alle 0,15 mm ja yhden asteen toistettavuuteen. Kokonaisuudessaan voidaan siis sanoa venttiilin ohjauksen toistettavuuden olevan todella hyvä, sillä lukuun ottamatta imuventtiilin sulkeutumisessa tapahtuvaa toistettavuuden ylitystä, molempien venttiiliprofiilin jokaisessa pisteessä päästään alle 3 asteen toistettavuuteen. Moottoritestissä ohjauksen toistettavuus saattaa kuitenkin olla huonompi, sillä rigitesteihin verrattuna olosuhteen muuttuvat enemmän muun muassa lämpötilan ja palokammiossa olevan paineen seurauksena.

Toimilaitteen ja ieksen välissä olevan välyksen on havaittu vaikuttavan venttiilin ohjaustarkkuuteen. Kyseisen välyksen suuruuden on aiemmin todettu vaihtelevan muun muassa lämpötilan, kuormituksen ja venttiilin kuopan kulumisen seurauksena. Välyksen vaikutuksen havainnollistamiseksi, ohjausmalliin implementoitiin välyksen suuruutta kuvaava muuttuja. Mallissa arvioitu välyksen suuruus vähennetään mitatusta venttiilin asemasta kalibroinnin yhteydessä. Todellisuudessa välyksen suuruus vaihtelee, joten tätä arvoa tulee myös vaihdella moottorin ajon aikana, jotta pystytään pitämään ohjaus mahdollisimman tarkkana.

Kuvassa 20 on havainnollistettu arvioitujen välysten vaikutusta venttiilin mitattuun asemaan. Kuvan testaustilanteessa on oletettu, että välyksen suuruus pienenee häiriöiden vaikutuksesta. Venttiilin referenssiasemaa on kuvattu yhtenäisellä sinisellä viivalla, kun taas mitattua venttiilin asemaa oletetuilla välyksen arvoilla on kuvattu erilaisilla katkoviivoilla. Testit on toteutettu keskenään samoilla asetuksilla ja ainoastaan arvioitua välyksen suuruutta on muutettu. Venttiilin asemaan on vaikutettu vain P-säätimen ja viiveenkompensoinnin avulla. Kuvasta nähdään venttiilin seuraavan referenssikäyrää sitä paremmin, mitä pienemmäksi välyksen suuruus on arvioitu. Mikäli välys määritellään liian pieneksi (arvioitu välys 1 mm) sulkeutuu venttiili odotettua aikaisemmin, jos taas välyksen vaikutusta ei huomioida, niin venttiili sulkeutuu mahdollisesti myöhemmin kuin halutaan. Lisäksi havaitaan, että välyksen pienentyessä myös venttiilin asemassa tapahtuva nytkähdys 490 kammenkulma asteen kohdalla loiventuu pienimmillä välyksillä. Luultavasti nytkähdys johtuu venttiilin todellisesta sulkeutumisesta, kun mekaaninen jousivoima ja toimilaitteen alakammiossa vallitseva paine pienenevät, jonka jälkeen kara jatkaa vielä hetken liikettään välyksestä johtuen. Nytkähdysten jyrkkyys

riippuu seurantavirheen suuruudesta, sillä P-säädin vahvistaa sitä. Kuvaajasta voidaan nähdä, että arvioidun välyksen ollessa 0,5 mm, päästään kyseisellä testaushetkellä parhaaseen ohjaustarkkuuteen. Tämä arvioitu välyksen suuruus vastaa todennäköisesti myös eniten todellista välystä. Näiden tulosten perusteella voidaan todeta, että välyksen tunnistuksella on vaikutusta venttiilin ohjaustarkkuuteen.



Kuva 20. Toimilaitteen ja ieksen välissä olevan välyksen vaikutus ohjaustarkkuuteen.

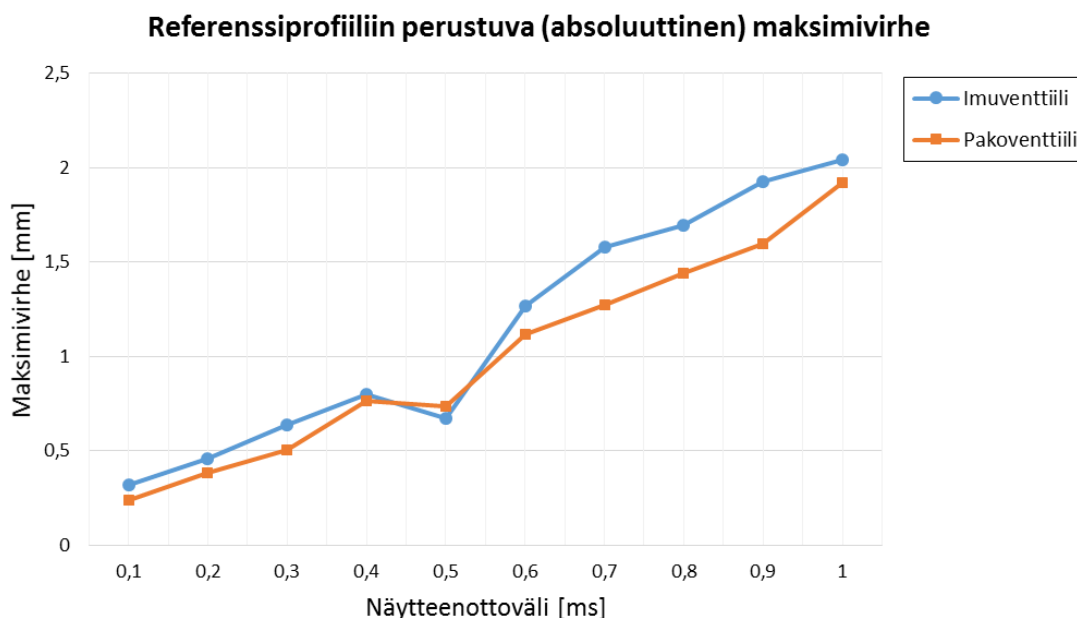
Testien perusteella voidaan todeta, mallin toimivan kuten halutaan ja venttiiliohjauksen olevan tarpeeksi tarkka, kun näytteenottovälinä käytetään 0,1 ms. Venttiilin asema-anturilta tulevaa mittausdataa ei suodateta, mikä saattaa aiheuttaa mittauskohinasta johtuvaa häiriötä mitattuun asemaan. Tämän häiriön osuus mitatusta asemasta on erittäin pieni, sillä se on vain 0,06 mm. Mittasignaalin suodatusta ei tehdä, sillä se aiheuttaa vaiheeroa, jonka seurauksena mallissa käytetty asema ei kuvaisi enää todellista asemaa.

6.2 Sopivan näytteenottovälin valinta

Työn vaatimusten pohjalta havaittiin, että mallin ohjauksessa käytetyn näytteenottovälin tulee olla pienempi kuin 0,2 ms, mikäli järjestelmässä käytetään 1200 rpm kierrosnopeutta. Kaikki tämän luvun testit on toteutettu kyseisellä kierrosnopeudella, joten sopivan näytteenottovälin oletetaan löytyvän sitä pienemmistä näytteenottoväleistä. Testien luotettavuuden vuoksi tarkastelu aloitettiin sitä suuremmista näytteenottoväleistä (1 ms), jonka jälkeen väliä pienennettiin, kunnes löydettiin pienin mahdollinen näytteenottoväli ilman prosessorin ylikuormittumista. Sopivan näytteenottovälin oletetaan löytyvän tältä väliltä. Luvun alussa tarkastellaan referenssiprofiiliin määrittämää teoreettista absoluuttia maksimivirhettä eri näytteenottoväleillä. Lisäksi sopivaa näytteenottoväliä selvitetään piirtämällä kuvaaja yhden iskun ajalta, jotta saadaan

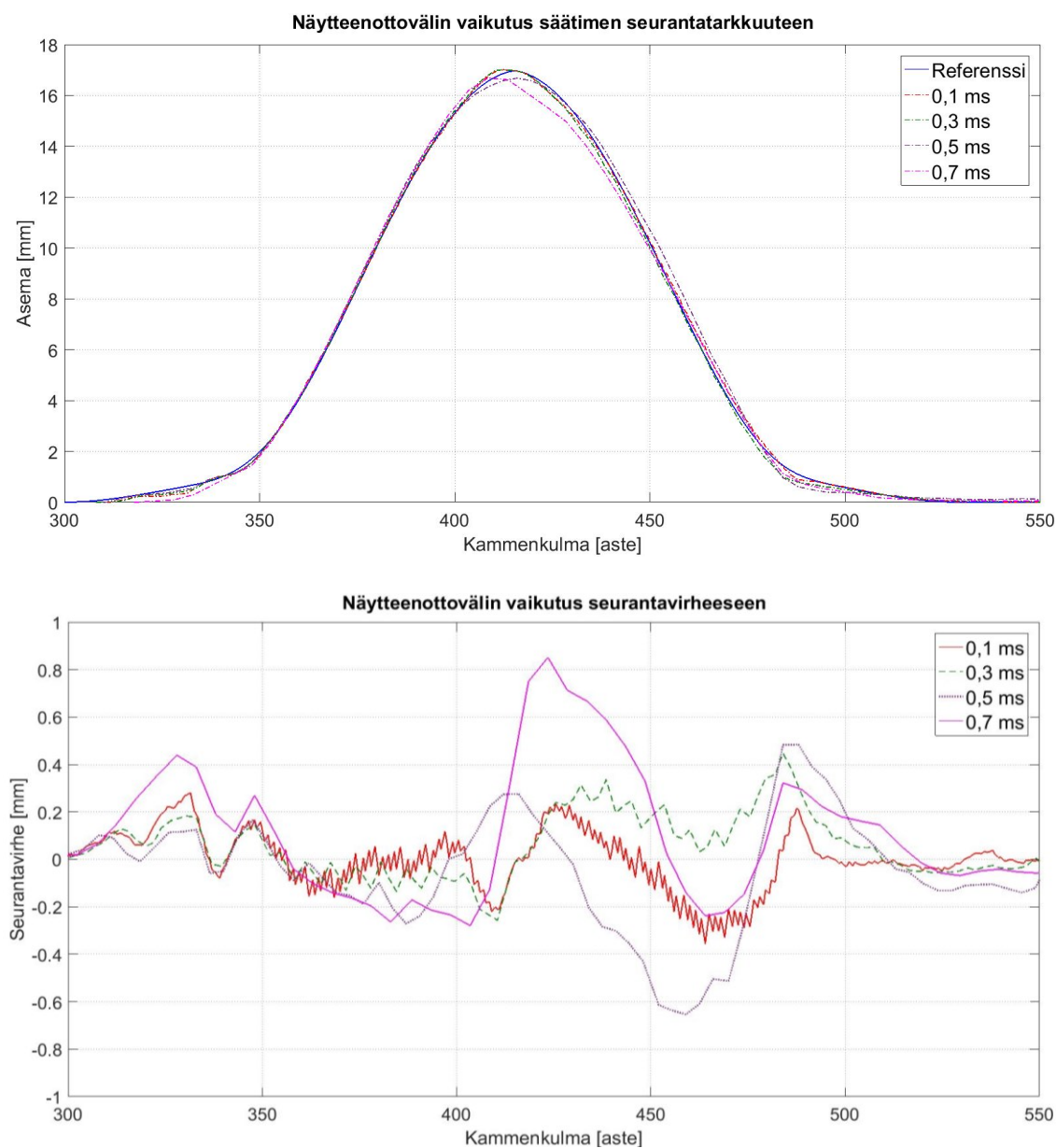
käsitys, miten seurantavirhe vaihtelee eri näytteenottoväleillä. Luvun lopussa vielä tarkastellaan näytteenottovälin vaikutusta 600:lla iskulla ohjauksen maksimivirheeseen, keskihajontaan ja toistettavuuteen.

Teoreettisen maksimivirheen selvittämiseksi lasketaan referenssiprofiilin kahden peräkkäisen pisteen välinen asemamuutos profiilin maksimikiihtyvyyden kohdassa (kuva 21). Kuten aiemmin todettiin niin käytetty referenssiprofiili vaikuttaa ohjaustarkkuuteen, joten profiilin maksimivirheen tarkastelu ilmaisee kuinka suuren virheen pelkkä käytetty profiili mahdollistaa ilman, että otetaan huomioon ympäristön ja venttiilin ominaisuuksien vaikutusta. Kuvassa 21 absoluuttinen maksimivirhe on laskettu samoilla asetusarvoilla ja vain käytettyä näytteenottoväliä on muutettu. Kuvassa imuventtiilissä käytetyn profiilin maksimivirheitä on merkattu sinisellä ja pakoventtiilin oranssilla värillä. Imu- ja pakoventtiilin maksimivirheen suuruutta tutkittaessa huomataan, että imuventtiilin maksimivirheet ovat suuremmat kuin pakoventtiilin. Tämä johtuu osaltaan siitä, että imuventtiilin referenssiprofiili on haastavampi toteuttaa. Kuvasta nähdään myös, että maksimivirhe kasvaa lähes lineaarisesti näytteenottovälin kasvaessa. Maksimikiihtyvyys saavutetaan samassa kammengkulmassa (venttiilin sulkeutuessa) lukuun ottamatta 0,5 ms ja 0,7 ms näytteenottovälejä. Jos maksimivirhettä tarkasteltaisiin näilläkin näytteenottoväleillä samassa kohdassa, olisivat käyrät molempien venttiileiden osalta vielä lineaarisemmat. Kuvan 21 perusteella järjestelmälle valitun näytteenottovälin tulisi olla pienempi kuin 0,2 ms, jotta päästään vaadittuun seurantatarkkuuteen.



Kuva 21. Referenssiprofiilin muutos kahden näytteen välillä profiilin maksimikihtyvyyden kohdassa.

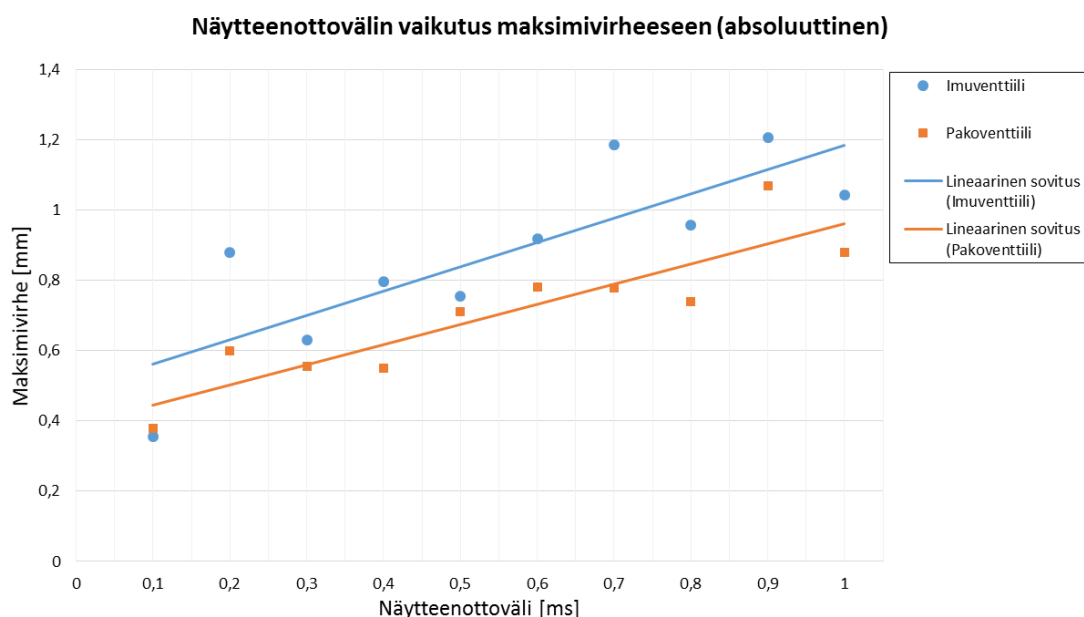
Kuvassa 22 tarkastellaan testattua imuventtiilin ohjaustarkkuutta eri näytteenottoväleillä. Tarkastelun kohteeksi on valittu imuventtiilin profiili sen haasteellisuuden vuoksi. Testeissä venttiilin ohjaus on viritetty jokaiselle käytetylle näytteenottovälille uudelleen, parhaan ohjaustarkkuuden saamiseksi. Muutettuja parametrien arvoja ovat P-kerroin, venttiilin kuormavoima, viivesäätimen vertailupisteen sijainti ja oppivan säätimen oppimisrajat. Suuremmilla näytteenottoväleillä käytetään pienempiä P-kertoimen arvoja, sillä liian suuren kertoimen käyttäminen aiheuttaa epästabiiliutta venttiilin asemaan ja kasvattaa venttiilin kulumista, joka taas lyhentää laitteiston käyttöikää. Lisäksi havaittiin, että parametreja on sitä haastavampaa virittää, mitä suurempaa näytteenottoväliä käytetään. Tämän perusteella voidaan todeta ohjauksen säädettävyyden huononevan näytteenottovälin kasvaessa.



Kuva 22. Eri näytteenottovälien vaikutus imuventtiilin ohjaustarkkuuteen.

Kuvasta 22 nähdään seurantavirheen pienenevän, kun näytteenottoväliä pienennetään. Pienemmillä näytteenottoväleillä maksimivirhe sijaitsee venttiilin avautumis- ja sulkeutumiskohdassa, kun taas suuremmilla näytteenottoväleillä se tapahtuu venttiilin ollessa täysin auki. Syy miksi seurantavirhe kasvaa suuremmilla näytteenottoväleillä eri kohdassa johtuu viritysparametreista, sillä suurimpien näytteenottovälien tapauksessa ei pystytty käyttämään yhtä suurta P-kertoimen arvoa.

Seuraavaksi tarkastellaan eri näytteenottovälien vaikutusta venttiilin ohjauksen absoluuttiseen maksimivirheeseen (kuva 23), keskihajontaan (kuva 24) ja toistettavuuteen (kuva 25). Näitä ominaisuuksia on haluttu tarkastella imu- ja pakoventtiilillä, jotta tulokset ovat luotettavampia. Imuventtiiliä on kuvattu sinisellä viivalla ja pakoventtiiliä oranssilla. Näissä kuvissa on käytetty samaa mittausdataa kuin kuvassa 22 mutta vain tutkittavat asiat ovat muuttuneet. Seuraavissa kuvissa tuloksia tarkastellaan yhden iskun sijaan 600:lla iskulla, jonka vuoksi maksimivirheet ovat edellä esitettyjä tuloksia suuremmat.

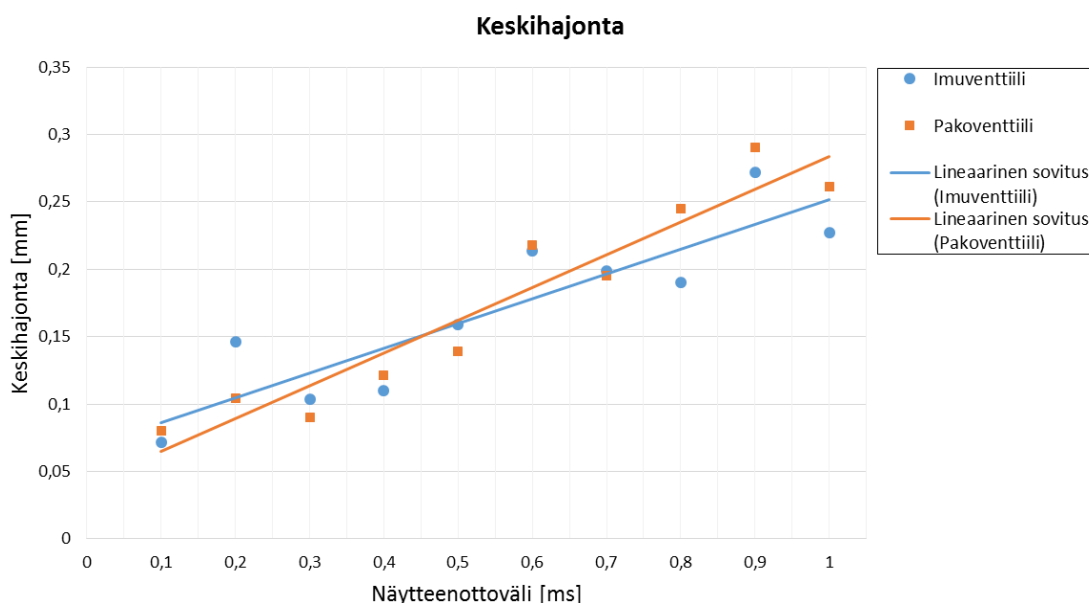


Kuva 23. Absoluuttinen maksimivirhe eri näytteenottoväleillä.

Eri näytteenottovälien maksimivirheiden perusteella on piirretty lineaarinen sovitus maksimivirheestä. Sovituksesta nähdään, että absoluuttinen maksimivirhe kasvaa näytteenottovälin kasvaessa, kuten teoreettisessakin tarkastelussa. Virhe kasvaa, sillä suuremmilla näytteenottoväleillä venttiilin asemaa ohjataan harvemmin, jolloin mahdolliset asemakorjaukset ovat isompia. Jokaiselle näytteenottovälille parametrit on viritetty uudelleen, minkä vuoksi maksimivirheissä on havaittavissa notkahtelua. Kaikkien näytteenottovälien osalta ei päästy todellisuudessa tarkimpaan seurantatarkkuuteen, vaikka silmämääräisesti olisi siltä näyttänytkin. Tämä voidaan havaita esimerkiksi 0,2 ms näytteenottovälillä, sillä siinä maksimivirhe on huomattavasti

lineaarista sovitusta suurempi molemmilla venttiileillä. Teoreettiseen maksimivirheeseen verrattaessa (kuva 21) havaitaan, että pienemmillä näytteenottoväleillä testattu maksimivirhe on suurempi kuin teoreettinen virhe, mikä johtuu järjestelmässä olevista häiriöistä ja säätimen dynamiikasta. Suuremmilla näytteenottoväleillä teoreettinen maksimivirhe on suurempi kuin testattu maksimivirhe, sillä käytetyt säätimet ovat mahdollistaneet paremman ohjaustarkkuuden. Käytetyn profiilin lisäksi ohjauksen maksimivirheeseen vaikuttaa merkittävästi järjestelmässä olevat häiriöt ja säätimien dynamiikka. Kuvan 23 testaustulosten perusteella järjestelmässä tulisi käyttää vähintään 0,1 ms näytteenottoväliä, jotta päästään haluttuun ohjaustarkkuuteen.

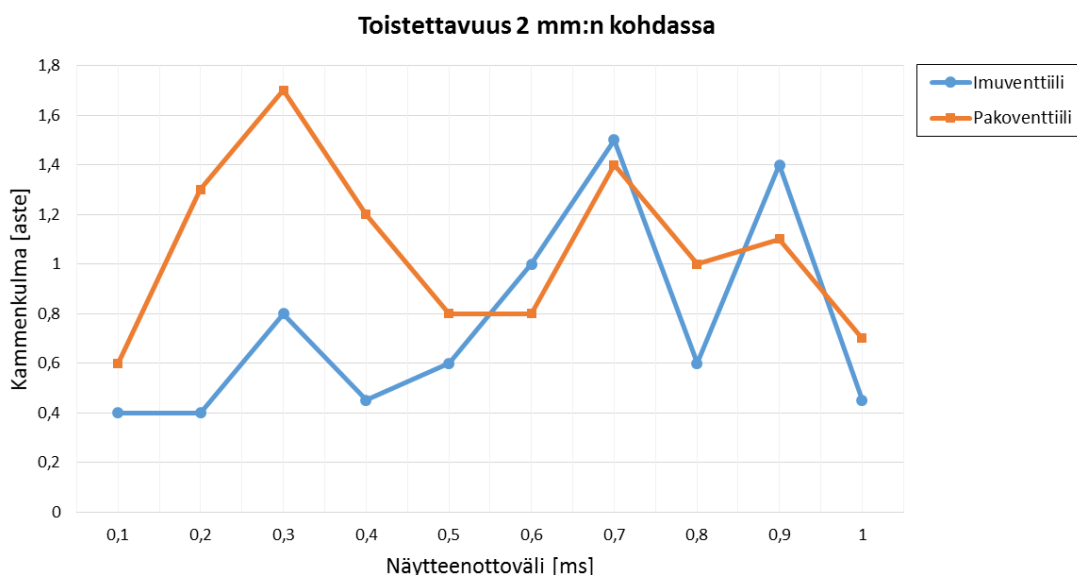
Näytteenottovälin vaikutusta seurantavirheen keskihajontaan esitetään kuvassa 24. Keskihajonta kuvaa tässä tapauksessa seurantavirheen keskimääräistä poikkeamaa keskiarvovirheestä. Mitä suurempi keskihajonta on, sitä suurempi myös seurantavirheen vaihtelu on ohjauksessa. Kuvasta nähdään myös keskihajonnan kasvavan näytteenottovälin kasvaessa. Molempien venttiilien seurantavirhe vaihtelee suhteessa yhtä paljon, sillä käyrät ovat melkein päällekkäin.



Kuva 24. Keskihajonta eri näytteenottoväleillä.

Näytteenottovälin vaikutusta venttiilin ohjauksen toistettavuuteen havainnollistetaan kuvassa 25. Toistettavuuden tarkastelupisteeksi on valittu kriittinen 2 mm kohta. Imuventtiilin osalta tarkastellaan avautumista, kun taas pakoventtiilin osalta tarkastellaan sulkeutumista. Kuvan perusteella voidaan todeta, että näytteenottovälin suuruudella ei ole vaikutusta venttiiliohjauksen toistettavuuteen, sillä se vaihtelee epäsäännöllisesti eri näytteenottoväleillä. Sen sijaan parametrien virityksellä voidaan olettaa olevan vaikutusta toistettavuuteen, sillä viritysparametrit on viritetty eri tavalla jokaiselle näytteenottovälille parhaan seurantatarkkuuden saamiseksi. Kaikilla näytteenottoväleillä

päästään kuitenkin alle 3 asteen toistettavuuteen, mikä on tärkeää venttiiliohjauksen kannalta.



Kuva 25. Venttiiliohjauksen toistettavuus eri näytteenottoväleillä.

Testaustulosten perusteella voidaan todeta käytetyllä näytteenottovälillä olevan suuri merkitys venttiilin ohjaustarkkuuteen. Näytteenottovälin kasvattamisen myötä maksimivirhe ja keskihajonta kasvavat sekä ohjauksen säädettävyyks huononee. Näytteenottovälillä ei havaittu olevan vaikutusta toistettavuuteen. Toistettavuus vaikuttaa kuitenkin ohjaustarkkuuteen, joten se tulee ottaa huomioon sopivan näytteenottovälin valinnassa. Testeissä havaittiin 0,1 ms olevan pienin mahdollinen näytteenottoväli ilman, että prosessori ylikuormittuu. Kyseinen näytteenottoväli mahdollistaa myös tarkimman ohjauksen, joten sitä tulisi käyttää järjestelmän näytteenottovälinä. Näytteenottoväli voisi olla kuitenkin isompikin, jos käytettäisiin pienempään moottorin kierrosnopeutta ja helpompaa venttiiliprofiilia.

Kuusisylinterinen venttiilimalli kuormittaa prosessoria keskimäärin 63 % sen koko laskentakapasiteetista, kun ohjauksessa käytetään 0,1 ms näytteenottoväliä. Jos päämalliin lisättäisiin kaikki moottorin ohjauksessa käytetyt ohjausmallit, prosessori ylikuormittuisi tällä näytteenottovälillä. Tämän vuoksi EHVA-järjestelmän ohjaus tulisi siirtää kokonaan tai osittain FPGA laskennan puolelle. Tällä tavalla saataisiin jaettua laskentatehoa, eikä vaarana olisi ylikuormittuminen tai ohjaustarkkuuden heikkeneminen. FPGA mahdollistaa vielä nopeamman laskennan kuin tavallinen prosessori, joten FPGA pohjaisella ohjauksella voitaisiin päästä mahdollisesti vielä parempaan ohjaustarkkuuteen. Tällöin voitaisiin varmistua, että huonoimmillakin profiileilla päästäisiin vaadittuun tarkkuuteen.

7. TULOSTEN TARKASTELU JA PÄÄTELMÄT

Edellisessä luvussa käsiteltiin uuden implementaatiomallin ominaisuuksia testaustulosten perusteella. Tämän luvun tarkoituksena on tarkastella kokonaisvaltaisesti koko työn aikana saavutettuja tuloksia työn tavoitteiden avulla. Lisäksi luvussa pohditaan EHVA-järjestelmän tulevaisuuden näkymiä, tulosten luotettavuutta sekä työn onnistumista.

Työn tärkeimpänä tavoitteena oli tehdä uusi implementaatiomalli, joka soveltuisi paremmin uudelle ohjausyksikölle. Tämän lisäksi haluttiin löytää sopiva näytteenottoväli mallille, jotta päästään vaadittuun seurantatarkkuuteen mahdollisimman pienellä prosessorin kuormituksella.

7.1 Implementaatiomalli

Uuden implementaatiomallin avulla yksinkertaistettiin mallissa olevaa laskentaa sekä saatiin se soveltumaan paremmin uudelle ohjausyksikölle. Mallista poistettiin runsaasti ylimääräistä laskentaa, eikä siihen lisätty uusia toimintoja. Tämän perusteella voidaan sanoa uuden implementaation vaativan vähemmän laskentakapasiteettia kuin vanha malli. Malli on kuitenkin edelleen melko raskas, joka johtuu suuresta toiminnallisuuksien määrästä. Mikäli mallin vaatimaa laskentakapasiteettia halutaan edelleen pienentää, tulee sen toiminnallisuuksia karsia, toteuttaa mallin laskenta eri tavalla, käyttää mallissa eri näytteenottovälejä tai käyttää vaihtoehtoja mikropiiriä (FPGA). FPGA:n ja prosessorin välinen kommunikointi asettaa kuitenkin rajoituksia, mikäli siirretään vain osa mallista FPGA:lle. Mallin rakenteen muuttaminen oli yksi merkittävimmistä muutoksista, joita uuteen implementaatioon tehtiin. Mallin rakenteen haluttiin pohjautuvan nopeisiin ja hitaisiin ohjauksiin, jotta laskentakapasiteettia voitaisiin tarvittaessa pienentää. Nopeiksi ohjauksiksi valittiin kaikki kriittisesti venttiilin ohjaustarkkuuteen vaikuttavat toiminnot, kuten venttiilin profiilin muodostaminen, mittausdatan käsittelylogiikka ja säätimet. Hitaiksi ohjauksiksi taas valittiin osa turvallisuuslogiikasta ja asetusarvojen käsittely toiminnot. Rakennemuutosten lisäksi malli toteutettiin muiden moottorimallien kanssa yhtäläistä mallinnustapaa käyttäen. Implementaatiomallin toimivuutta testattiin aluksi prosessimallin avulla, jonka jälkeen sitä testattiin rigillä. Testaustulosten perusteella voidaan todeta mallin toimivan halutulla tavalla. Tältä osin työn tärkein tavoite saavutetaan.

7.2 Ohjaustarkkuus

Venttiilin ohjaustarkkuuteen vaikuttaa järjestelmässä käytettyjen komponenttien ja laitteiston ominaisuudet. Tämän vuoksi komponenttien ominaisuuksia tutkittiin, jotta ne

eivät rajoittaisi ohjaustarkkuutta. Teknisiltä ominaisuuksiltaan vain esiohjausventtiilin toiminta-alueessa havaittiin olevan puutteita. Esiohjausventtiili on juuri ja juuri tarpeeksi nopea tämän hetkiseen järjestelmään. Lisäksi venttiilin ohjaus ei ole lineaarinen koko sen ohjausalueella. Venttiilin ohjauksen alussa ja lopussa on havaittavissa epälineaarisuutta. Markkinoilta etsittiin ominaisuuksiltaan parempaa esiohjausventtiiliä, mutta sellaista ei löytynyt. Digitaalihydrauliikan on havaittu olevan potentiaalinen vaihtoehto servojärjestelmiin. Siinä rinnankytkettyjen on/off –venttiileiden avulla voidaan toteuttaa energiatehokkaampi ja nopeampi ohjaus, kuin servo- tai proportionaaliventtiileillä (Linjama et al. 2003, s.1). EHVA-järjestelmän ohjauksen toteuttamista digitaalihydrauliikan avulla onkin kokeiltu, mutta se on tyrmätty huonon ohjattavuuden ja liian suuren energiakulutuksen myötä (Rodriguez 2013, s.3).

Työn teoreettisen tarkastelun ja testaustulosten perusteella havaittiin usean tekijän vaikuttavan ohjaustarkkuuteen. Tällaisia ominaisuuksia ovat käytetty näytteenottoväli, järjestelmässä olevat säätimet, kierrosnopeus, valittu venttiiliprofiili, venttiilin dynamiikka, säätimien virittäminen sekä toimilaitteen ja ieksen välissä olevan välyksen suuruus. Tässä työssä tarkasteltiin erityisesti säätimien ja näytteenottovälin vaikutusta ohjaustarkkuuteen. Rigitestien perusteella voidaan todeta, että järjestelmässä tällä hetkellä käytetyillä säätimillä päästään riittävän hyvään tarkkuuteen. Mikäli järjestelmän tarkkuutta halutaan parantaa, voitaisiin siihen tuoda vielä säädin, joka kompensoisi välyksen suuruuden vaihteluista aiheutuvat häiriöt. Mitään olemassa olevaa säädintä ei kuitenkaan kannata poistaa tai vaihtaa. Vaatimusten mukainen ohjaustarkkuus saavutettiin, kun näytteenottovälinä käytettiin 0,1 ms. Sopivan näytteenottovälin valitsemiseksi tarkasteltiin referenssiprofiiliin perustuvaa teoreettista absoluuttivirhettä, testeihin perustuvaa absoluuttista maksimivirhettä, keskihajontaa sekä toistettavuutta. Muutosten myötä on vaikea sanoa, parantuiko järjestelmän ohjaustarkkuus, sillä mallia ei ole aikaisemmin testattu testirigillä näin suurta kierrosnopeutta käyttäen. Testimoottorilla tulee valitun näytteenottovälin olla edellä esitettyä pienempi, sillä rigitesteissä seurantatarkkuutta eivät ole heikentäneet todellisella moottorilla vaikuttavat häiriöt, jotka johtuvat palokammiossa olevista paine- ja lämpötilamuutoksista.

Valittu näytteenottoväli tuo lisävaatimuksia moottorin nopeuden mittaukseen, sillä luvussa 2.4 esitellyn taulukon 3 perusteella 0,1 ms näytteenottoväli vastaa noin yhden kammenkulma-asteen tarkkuutta. Moottorilla nopeuden mittausta tehdään kuitenkin kolmen asteen välein, joten paremman ohjaustarkkuuden saamiseksi tulisi nopeuden mittaussväliä pienentää.

7.3 Prosessorin kuormitus

Valitulla 0,1 ms näytteenottovälillä kuormitetaan tavallista prosessoria keskimäärin 63 % sen koko laskentakapasiteetista, vaikka mallin laskentaa on yksinkertaistettu ja

kevennetty. Kyseinen näytteenottoväli on myös pienin näytteenottoväli, jota voidaan käyttää ilman, että tapahtuu prosessorin ylikuormittumista. Speedgoatin ohjausyksikköön ei ole mahdollista lisätä tavallisen prosessorin laskentakapasiteettia, vaan laskentakapasiteetin lisäykset tulee tehdä FPGA:n avulla. Uuden implementaatiomallin käyttöönotto moottorilla vaatii, että osa mallin laskennasta siirretään FPGA:lle. FPGA:n käyttäminen mahdollistaa, että ohjauksessa voidaan käyttää vielä pienempää näytteenottoväliä ilman prosessorin ylikuormittumista. Tämä taas mahdollistaa entistä paremman ohjaustarkkuuden, sillä seurantavirheen on havaittu pienenevän lähes lineaarisesti näytteenottovälin pienentyessä. Ohjaustarkkuutta voidaan parantaa, kuitenkin vai tiettyyn pisteeseen asti, jonka jälkeen järjestelmässä käytetyt komponentit tulevat rajoittaviksi tekijöiksi. FPGA ympäristössä toiminnallisuuksien mallintaminen on hyvin työlästä ja muutosten tekeminen hidasta, minkä vuoksi koko FPGA:lle kannattaa siirtää vain määritellyt nopeat ohjaukset kaikkien toimintojen siirtämisen sijaan.

7.4 Tulevaisuuden näkymät

Implementaatiomallia tullaan testaamaan vielä testimoottorilla ennen sen käyttöönottoa tuotekehityksessä. Näissä testeissä halutaan varmistua, että eri sylintereissä olevien venttiileiden yhtäaikainen ohjaus toimii moitteettomasti. Lisäksi testimoottorin avulla pystytään määrittämään tarkemmin sopiva näytteenottoväli. Tulevaisuudessa implementaatiomallista tullaan vielä tekemään uusi versio, jossa osa ohjauksista on toteutettu FPGA:lla ja osa tavallisella prosessorilla. Tällä tavalla päästään parempaan ohjaustarkkuuteen ylikuormittamatta kuitenkaan prosessoria. Aikaisemman kokemuksen perusteella tiedetään, että simulinkissa isojen taulukkojen käsitteleminen vie paljon laskentakapasiteettia. EHVA-mallissa venttiilin profiilin luonti perustuu taulukkoon. Tämän vuoksi tulevaisuudessa voitaisiin harkita venttiilin liikkeen toteuttamista funktioiden avulla.

Käytetyt komponentit kehittyvät koko ajan, joten luultavasti muutaman vuoden kuluttua markkinoilta voisi löytyä entistä nopeampia ja parempia komponentteja, joiden avulla pystytään parantamaan ohjaustarkkuutta entisestään. Tekniikan kehittyminen voisi mahdollistaa myös EHVA-järjestelmän toteuttamisen entistä edullisemmin, energiatehokkaammin ja yksinkertaisemmin. Paremman teknisen toteutuksen myötä järjestelmässä olisi mahdollista käyttää myös yksinkertaisempia säätimiä tai evaluoida kunnolla P-säätimeen lisättävän D-osan käyttöä hyvin suunniteltujen mittasignaalin suodattimien kanssa. Ohjaustarkkuuden parantamiseksi voitaisiin aseman mittasignaali suodattaa, jotta mittauskohinasta johtuvan häiriön vaikutusta saataisiin pienennettyä. Suodattaminen aiheuttaa kuitenkin vaihe-eroa. Tämän vuoksi mallin laskenta tulee muuttaa sellaiseksi, että ohjaus vastaa todellista asemaa eikä suodatuksen myötä viivästynyttä asemaa.

Testaustulosten perusteella havaittiin seurantavirheen olevan suurimmillaan venttiilin avautuessa ja sulkeutuessa sekä venttiilin ollessa täysin auki. Valmistajan antamista teknisistä tiedoista venttiilin dynamiikasta havaitaan, ettei venttiili ole lineaarinen näissä kohdissa. Tulevaisuudessa ohjaustarkkuuden parantamiseksi ohjauksessa voitaisiin kokeilla ohivirtaussäätöä. Sen lisäksi venttiilin liikkeessä havaittiin tapahtuvan nytkähdys sen avautuessa ja sulkeutuessa. Nytkähdysten oletetaan johtuvan välyksestä toimilaitteen ja ieksen välissä. Mikäli sen syytä halutaan vielä tarkastella tulisi tutkia tarkemmin imukammiossa olevaa painetta venttiilin liikkeen aikana. Toimilaitteen ja ieksen välissä olevan välyksen suuruudella havaittiin olevan myös vaikutusta venttiilin ohjaustarkkuuteen. Tämän työn testien perusteella ohjausmalliin kannattaisi lisätä uusi säädin, joka huomioisi välyksen muutokset, jokaisella syklillä. Tämän säätimen toiminta voisi perustua sisääntulokammiossa olevaan paine-eroon venttiilin avautuessa. Juuri ennen imuventtiilin avautumista paine nousee äkillisesti korkeaksi, sillä venttiilin tulee voittaa jousivoiman aiheuttama voima ennen, kuin se avautuu. Säätimen toiminta voisi perustua myötäkytkentään. Siinä mitatusta paine-erosta lasketaan derivaatta, jotta saataisiin laskettua todellinen avautumiskohta. Tämän tiedon perusteella suoritetaan kalibrointi, jotta välyksen vaikutus saataisiin poistettua. Toteutuksen myötä voitaisiin myös ennakoida mahdolliset anturiviat aikaisemmassa vaiheessa sekä paikantaa tarkemmin venttiilin todellinen avautumiskohta. Uuden säätimen lisääminen kuitenkin kasvattaa mallissa olevien toiminnallisuuksien määrää ja sitä kautta kasvattaa prosessorin kuormitusta.

Tällä hetkellä EHVA-järjestelmä on analoginen, mutta tulevaisuudessa olisi järkevää pyrkiä digitaaliseen toteutukseen. Tämä mahdollistaa tiedonsiirtokapasiteetin kasvattamisen, jolloin esimerkiksi FPGA-toteutuksen yhteydessä FPGA:n ja prosessorin välinen kommunikointikaista kapenisi. Tulevaisuudessa EHVA-järjestelmää kannattaisi käyttää myös tuotantomootoreissa, jolloin moottori soveltuisi paremmin eri käyttöolosuhteisiin. Tällöin moottorin ohjaussovellusten avulla pystyttäisiin vaikuttamaan venttiileiden ohjaukseen, jonka myötä parannettaisiin moottorin suorituskykyä.

8. YHTEENVETO

EHVA-järjestelmän avulla ohjataan sähköhydraulisesti moottorin kaasunvaihtventtiileitä. Järjestelmää käytetään tuotekehityksessä erilaisten nokka-akselin profiilien evaluointiin. Rapid control prototyping -projektin myötä järjestelmää haluttiin kehittää uutta ohjausyksikköä varten sopivammaksi. Tämän työn tarkoituksena olikin tehdä uusi yksinkertaisempi implementaatiomalli aikaisempaan ohjausyksikköön perustuvasta mallista. Sen lisäksi ohjaukselle haluttiin löytää sopiva näytteenottoväli, jotta päästään vaatimusten mukaiseen seurantatarkkuuteen ja vältetään prosessorin ylikuormittamiselta.

Venttiilin ohjaustarkkuus on yksi tärkeimmistä EHVA-järjestelmältä vaadituista ominaisuuksista, sillä mitä tarkemmin eri nokkaprofiileja pystytään testaamaan, sitä luotettavampaa tietoa saadaan sopivan nokkaprofiilin valinnassa. Tämän työn teoreettisessa osuudessa keskityttiin pääasiassa venttiilin ohjaustarkkuuden parantamiseen säätimien ja näytteenottovälin avulla. Sähköhydraulisissa venttiilin ohjausjärjestelmissä käytettyjä säädin ratkaisuja kartoitettiin ja niiden pohjalta käytetyimpiä säätimiä ovat: PID-, mallipohjainen-, oppiva-, adaptiivinen- ja liukuvan moodin säätö. Osaa näistä säätimistä käytetään myös EHVA-järjestelmän ohjauksessa. Järjestelmässä käytettyjen säätimien valintaan vaikuttavat kuitenkin merkittävästi muun muassa järjestelmän toteutustapa, käyttökohde ja vaatimukset. Työssä selvitettiin myös, etteivät järjestelmässä käytetyt komponentit sisällä tekijöitä, jotka rajoittavat haluttua ohjaustarkkuutta. Tämän tarkastelun perusteella havaittiin esiohjausventtiilin nopeuden olevan yksi kriittisistä tekijöistä. Markkinoilla olevia vaihtoehtoisia venttiileitä kartoitettiin, mutta parempaa venttiiliä tähän järjestelmään ei löytynyt. Sopivan näytteenottovälin tarkastelun yhteydessä esiteltiin myös tapoja, joiden avulla käytettyä laskentatehoa voidaan pienentää. Laskentatehoa voidaan pienentää käyttämällä järjestelmässä useaa näytteenottoväliä, jakamalla laskentaa eri ytimille tai siirtämällä laskentaa tehokkaammalle mikropiirille (FPGA).

Työssä kehitetyn uuden implementaatiomallin toimivuutta testattiin aluksi prosessimallin avulla, jonka jälkeen järjestelmän käyttäytymistä tutkittiin tarkemmin rigitestien avulla. Testeissä todettiin uuden implementaatiomallin toimivan halutulla tavalla. Järjestelmän kannalta parhaaksi näytteenottoväliksi testien perusteella valikoitui 0,1 ms. Valinta perustui seurantavirheen suuruuteen ja sitä tarkasteltiin absoluuttisen maksimivirheen, keskihajonnan ja toistettavuuden avulla. Ohjauksen toistettavuus oli hyvä, eikä eri näytteenottovälien havaittu vaikuttavan siihen. Rigitesteissä ohjaustarkkuuteen havaittiin vaikuttavan käytettävä referenssiprofiili, säätimien virittäminen, näytteenottoväli sekä ieksen ja toimilaitteen välissä olevan välyksen suuruus. Seurantavirheen havaittiin

kasvavan lähes lineaarisesti näytteenottoväliä kasvatettaessa. Lisäksi säätimen dynamiikan havaittiin heikkenevän näytteenottoväliä kasvatettaessa. Rigitestit eivät kuitenkaan vastaa todellisen moottorin olosuhteista, minkä vuoksi moottorilla järjestelmää käytettäessä tulisi näytteenottovälin olla todennäköisesti vielä pienempi, jotta päästään vaadittuun ohjaustarkkuuteen.

Rigitestien perusteella valitulla näytteenottovälillä kuormitetaan prosessoria keskimäärin 63 % sen koko laskentakapasiteetista. Täten osa mallin toiminnallisuuksista olisi syytä toteuttaa FPGA ympäristössä. Uuden implementaatiomallin myötä laskentaa saatiin hieman kevennettyä. Suuremmat kevennykset kuitenkin vaatisivat radikaalimpia muutoksia malliin, sillä malli sisältää itsessään niin paljon toiminnallisuutta. Alla olevaan taulukkoon 4 on koottu työn keskeisimmät asiat.

Taulukko 4. *Lyhyt yhteenveto työn keskeisimmästä sisällöstä.*

Aihe	Analysoida ja parantaa EHVA-järjestelmää
Vaatimukset	Ohjaustarkkuus: 0,5–1 mm ja 3 kammenkulma-astetta, hyvä toistettavuus, yksinkertaisempi ohjausmalli
Kehityskohteet	Uusi implementaatio malli, sopiva näytteenottoväli, ohjaustarkkuuteen vaikuttavien asioiden selvittäminen
Tulokset	Uusi implementaatiomalli toimii, haluttu ohjaustarkkuus saavutettiin 0,1 ms näytteenottovälillä, jolloin prosessorin keskimääräinen kuormitus oli noin 63 % sen koko kapasiteetista
Suurimmat muutokset	Implementaatiomallin toteutus, Uusi rakenne ohjausmallille, Mallinnustyyli
Suurimmat ongelmat	Rajallinen prosessorin laskentateho. Malli sisältää todella paljon toiminnallisuuksia, Markkinoilla ei ole tarpeeksi nopeita hydrauliventtiileitä

Tulevaisuudessa mallin toimivuutta tullaan testaamaan vielä testimoottorilla ennen sen käyttöönottoa tuotekehitysprosessissa. Ennen mallin siirtämistä testimoottorille tulee osa sen laskennasta siirtää FPGA:lle, jotta vältetään ylikuormitustilanteet, kun ohjausyksikköä käytetään myös muiden moottorin toimintojen ohjaamiseen. FPGA tuo kuitenkin omat haasteensa mallinnusprosessiin, sillä muutosten tekeminen on hidasta ja työlästä. Lisäksi tulevaisuudessa voitaisiin pohtia kannattaisiko järjestelmään tuoda vielä yksi säädin lisää, joka huomioisi toimilaitteen ja ieksen välissä olevan välyksen suuruuden muutokset. Tosin uuden säätimen tuominen jo tällä hetkellä raskaaseen malliin kuormittaisi prosessoria entistä enemmän, mutta sen avulla voitaisiin paikoittaa paremmin kohta, jossa tapahtuu venttiilin todellinen avautuminen ja sulkeutuminen. Pitkällä tähtäimellä EHVA-järjestelmästä tuli kehittää niin energia tehokas ja edullinen

toteutus, että sen avulla voitaisiin korvata tuotantomootoreissa olevat nokka-akselit, jotta moottori pystyisi suunnitellun kierrosnopeuden kaltaisiin tuloksiin myös muilla kierrosnopeuksilla.

Kokonaisuudessaan työn voidaan sanoa onnistuneen hyvin, sillä kaikkiin vaadittuihin tavoitteisiin päästiin. Työn tärkeimpien tavoitteiden, eli uuden yksinkertaisemman implementaatiomallin toteuttamisen ja sille sopivan näytteenottovälin valinnan voidaan sanoa onnistuneen erittäin hyvin. Uuden implmentaatiomallin tekeminen ja sen toimivuuden validointi oli yksi työn työläimmistä ja aikaa vievimmistä osuuksista. Vaadittuun ohjaustarkkuuteen pääseminen myös testimoottorilla edellyttää, että osa laskennasta viedään FPGA:lle. FPGA tarpeen selvittäminen oli myös yksi asetetuista tavoitteista. Vaikka EHVA-järjestelmää on kehitetty jo useamman vuoden ajan, vielä sille löytyy useita kehityskohteita ja täten sen tulevaisuuden näkymät vaikuttavatkin hyvin lupaavilta.

LÄHTEET

ABB, Analog signal converters, Electronic relays and control, Catalog 2016, Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/ebf9ed79582746bc935e8a4dc419f63a/2CDC110004C0210_CC_Range.pdf

Alrefo, I. (2016) Design of Industrial Electro-Hydraulic Valves, New Approach, Journal of Engineering Research and Application, Vol 6, Issue 9, pp. 58–62

Belanger, J., Venne, P., Paquin, J.-N. The What, Where and Why of Real-Time Simulation, Institute of Electrical and Electronics Engineering, pp. 37–49.

Bhat, A. (2015) Concurrent Execution with Simulink Real-Time and Multicore Target Hardware, Mathworks, Technical Articles and Newletters, verkkosivu Saatavissa (27.4.2017): <https://se.mathworks.com/company/newsletters/articles/concurrent-execution-with-simulink-real-time-and-multicore-target-hardware.html>

Bringmann, E., Krämer, A. (2008) Model-based Testing Automotive Systems, International Conference on Software Testing, Verification and Validation, IEEE computer society, pp. 485–493.

Camacho, E., Bordons, C. (2007) Model predictive control, Advanced Textbooks in Control and Signal Processing, 2nd edition, Springer, London, 405 p.

Chao, H., Yanjun, H., Jian, J., Khajepour, A. (2016) Development of a Robust Controller for Electro-Hydraulic Variable Valve Actuation System, Automotive Safety and Energy, Vol. 7 (1), pp. 100–107

Chen, Y., Ahn, H., Moore, K. (2012) Iterative learning control, Encyclopedia of the Sciences of Learning, Vol 3, Springer, pp. 1648–1652.

dSpace (2007) DS 1005 PPC Board, dSpace catalog, 8 p. Saatavissa: http://www.ceanet.com.au/Portals/0/documents/products/dSPACE/dSPACE-flyer2007_DS1005_p484.pdf

dSpace (2013) Electric Drive Technology at dSPACE, Developing and Testing Electronic Control Units, 60 p., verkkosivu Saatavissa (viitattu 29.3.2017): https://www.dspace.com/shared/data/bkm/ElectricalDrive_en/blaetterkatalog/index.html#18/z

Dubey, R. (2008) Introduction to Embedded System Design Using Field Programmed Gate Arrays, India, Springer, 154 p.

Edge, K. (1996) The control of fluid power systems—Responding to the challenges, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems and Control Engineering, Vol 211(2), pp. 91–110

Edwards, C., Spurgeon, S. (1998) Sliding Mode Control: Theory and Applications, Taylor & Francis Ltd, 237 p.

Fleming, A., Leang, K. (2014) Modeling and Control of Nanopositioning Systems, Springer, 411 p.

Fonselius, J., Rinkinen, J., Vilenius, M. (2006) Koneautomaatio: Servotekniikka (2. p.). Tampere: Tampereen yliopistopaine oy, 193 s.

Fonselius, J., Rinkinen, J., Vilenius, M. (2008) Koneautomaatio: Hydrauliiikka II (3. p.). Tampere: Tampereen yliopistopaino Oy, 226 s.

Halderman, J. (2015) Automotive engines: theory and servicing, eighth edition, Boston: Pearson, 608 p.

Hara, S., Suga, S., Watanabe, S., Nakamura. (2009) Variable Valve Actuation System for Environmentally Friendly Engines, Hitachi Review, Vol 58(7), pp. 319–324

Hehn, A. (1993) Plant engineering's fluid power handbook, Volume 2: System Applications and Components, Gulf Publishing Company, 298 p.

Herranen, M. (2014) Fully Variable Valve actuation in Large Bore Diesel Engines, Tampere University of Technology, Publication 1239, 117 p., Saatavissa: [https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/fully-variable-valve-actuation-in-large-bore-diesel-engines\(cdb9e64d-d810-4514-bf9c-34366b193c3d\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/en/publications/fully-variable-valve-actuation-in-large-bore-diesel-engines(cdb9e64d-d810-4514-bf9c-34366b193c3d).html)

Hölttä, V., Palmroth, L., Eriksson, L. (2004) Rapid control prototyping tutorial with application examples, sim-serv, 4 p.

Isermann, R. (2014) Engine Modeling and Control: Modeling and Electronic Management of Internal Combustion Engines, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 637 p.

Johnson, J. (2010) Q&A about hydraulic servo and proportional valves, Hydraulic & pneumatics, verkkosivu Saatavissa (viitattu 29.3.2017): <http://hydraulicspneumatics.com/200/TechZone/HydraulicValves/Article/False/86050/TechZone-HydraulicValves>

Kauranne, H., Kajaste, J., Vilenius, M. (2008) Hydraulitekniiikka, Helsinki: WSOY Oppimateriaalit, 487 s.

Kim, J., Lieu, D. (2007) A New Electromagnetic Engine Valve Actuator with Less Energy Consumption for Variable Valve Timing, *Journal of Mechanical Science and Technology* 21, USA, pp. 602–606.

Lamas, M. I., Rodriguez, C. (2012) Emissions from Marine Engines and NO_x reduction Methods, *Journal of maritime research*, Vol 4(1). 1, pp. 77–82.

Liao, H., Roelle, M., Gerdes, J. (2008) Repetitive control of an Electro-Hydraulic Engine Valve Actuation System, *American Control Conference*, USA, pp.975–980.

Linjama, M., Laamanen, A., Vilenous, M. (2003) Is it time for digital hydraulics?, *The eight Scandinavian International Conference on Fluid Power*, Tampere, 20 p.

Liu, L., Chang, S. (2011) Improvement of valve seating performance of engine's electromagnetic valvetrain, *Mechatronics* 21, Elsevier, pp. 1234–1238

Liu, K., Yang, J., Jiang, W., Li, Y., Wang, Y., Feng, R., Chen, X., Ma, K. (2016) Energy of asynchronous valve timing on combustion characteristic and performance of a high speed SI marine engine with five valves, *Energy Conversion and Management*, Elsevier, vol 123, pp. 185–199

Majanne, Y. (2015) Kehittyneet menetelmät prosessien säädössä, Etumatkaa automaatiolla, Tampereen teknillinen yliopisto, Systeemitekniikanlaitos, Saatavissa (viitattu 6.2.2017): <http://www.slideshare.net/Prizztech/kehittyneet-prosessien-stmenetelmt>

Marlin, T. (1995) *Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance*, McGraw-Hill, New York, 945 p.

Mathworks (2017) CPU overload Options, verkkosivu Saatavissa (viitattu 26.4.2017): <https://se.mathworks.com/help/xpc/ug/target-computer-cpu-overloads.html>

Paden, B. A., Snyder, S. T., Paden, B. E., Ricci, M. R. (2015) Modeling and Control of an Electromagnetic Variable Valve Actuation System, Vol 20(6), pp. 2654–2665.

Parker Hannifin Corporation (2013) Direct Operated Proportional DC valve series D3FP, 6 p. Saatavissa: http://www.parker.com/literature/Hydraulic%20Controls%20Europe/HY11-3500UK/PDF_2013/D3FP%20UK.pdf

Parker Hannifin Corporation (2014) Direct Operated Proportional DC Valves, Catalog HY14-2550/US, pp. A61-A72. Saatavissa: http://www.parkerstore.jp/phj/catalog/pdf/english_ex/EHYD2_Electrohydraulic_Motion_Control_Products-Cat_HY142550_US_EN/EHYD2_Electrohydraulic_HY14-2550US_4_HY14-2550a010.pdf

Positek Ltd (2017), LIPS P100 Cylinder-Linear Position sensor, verkkosivu Saatavissa (1.4.2017): <http://www.positek.com/p100-cylinder-linear-position-sensor>

Pournazeri, M., Khajepour, A., Fazeli, A. (2011) An Efficient Lift Control Technique in Electro-hydraulic Camless Valvetrain Using Variable Speed Hydraulic Pump, Sae International, 12 p.

Pradeep, K., Xingyong, S., Zongxuan, S. (2014) Time-Varying Internal Model-Based Control of a Camless Engine Valve Actuation System, IEE Transactions on control system technology, Vol. 22, pp.1498–1510.

Ren, Z., Zhu, G. (2010) Multirate Closed-Loop System Identification of a Variable Valve Timing Actuator for an Internal Combustion Engine, American Control Conference, USA, pp. 664–669.

Rodriguez, J. (2013) Final report and conclusion from, DigiEHVA project, Wärtsilä internal, 11 p.

Santos, M., Neme, J., Franco, F., Stevan, S. Torres, W., Lugli, A., Lagana, A., Justo, J. (2015) Rapid control prototyping for automotive software in power windows systems, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 11(4), pp. 1341–1356.

Savolainen, J. PID-säätimen rakenne, (2010) Proportional-integral-derivattive-säädin, Koneautomaatio, Metropolia. Saatavissa (viitattu 31.1.2017): <https://wiki.metropolia.fi/pages/viewpage.action?pageId=12159966>

Schmidt, R. Digital Signals- Sampling and Quantization, RS met, Saatavissa: <http://www.rs-met.com/documents/tutorials/DigitalSignals.pdf>

Seborg, D., Edgar, T., Mellichamp, D., Doyle III, F. (2011) Process Dynamics and Control, 3rd edition, Wiley Sons Inc, United States of America, 514 p.

Speedgoat (2017) Performance real-time target machine – Expandability, verkkosivu Saatavissa (viitattu 19.4.2017): <https://www.speedgoat.ch/Products/Real-time-target-machines-Performance-Expandability.aspx>

Steinbuch, M., Molengraft, R. (2000) Iterative learning control of industrial motion systems, Mechatronic systems: a proceedings volume from the IFAC conference, Germany, Vol.3, pp. 1–6

Stienecker, A. (2011) PID control, Dr. Stienecker's TECH site, verkkosivu Saatavissa: <https://drstienecker.com/> (viitattu 31.1.2017)

Sun, Z., Cleary, D. (2003) Dynamics and Control of an Electro-Hydraulic Fully Flexible Valve Actuation System, IEE, Proceedings of the American Control Conference Denver, Colorado, pp. 3119–3123.

Wallén, J (2011) Estimation based iterative learning control, Linköping University, Publication 1358, Linköping, Sweden, 180 p. Saatavissa: <http://www.control.isy.liu.se/research/reports/Ph.D.Thesis/PhD1358.pdf>

Wilhelmsson, C., Tunestål, P., Johansson, B. (2006) FPGA Based Engine Feedback Control Algorithms, FISITA 2006 World Automotive Congress, Lund University, Sweden, 12 p.

Wärtsilä (2016) Wärtsilä 20 Product Guide, 178 p., Saatavissa: <http://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/ms-engine/product-guide-o-e-w20.pdf?sfvrsn=4>

Wärtsilä (2017) Rapid Control Prototyping-Workflow, internal material

Wärtsilä engine services (2016) Wärtsilä UNIC engine control system for diesel engines, Product leaflet, 2 p. Saatavissa: <http://cdn.wartsila.com/docs/default-source/service-catalogue-files/electrical-automation-services/w%C3%A4rtsil%C3%A4-unic-engine-control-system-for-diesel-engines.pdf?sfvrsn=4>

Zongxuan, S., Zhu, G. (2014) Design and Control of Automotive Propulsion Systems, Taylor & Francis Group, 218 p.

Åström, K., Hägglund, T. (1995) PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, International Society of Automation, 2nd edition, United States of America, 343 p.

Åström, K., Murrey, R. (2008) Feedback systems: an introduction for scientists and engineers, NJ: Princeton University Press, Princeton, 396 p.

Åström, K., Wittenmark, B. (1997) Computer –controlled systems: theory and design, Prentice-Hall information and system sciences series, 3rd edition, Upper Saddle River, 557 p.